

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra telekomunikační techniky

Ověření funkce modemu PLC na sdělovacích vedeních

Testing of PLC modem on twisted pairs

leden 2016

Diplomant:

Ladislav Karlovský

Vedoucí práce:

doc. Ing. Jiří Vodrážka, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci vypracoval sám s přispěním vedoucího práce a využíval jsem pouze zdrojů uvedených v seznamu odborné literatury. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování své diplomové práce či její části se souhlasem katedry.

V Praze dne: _____

Podpis autora

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra telekomunikační techniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Ladislav Karlovský**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Sítě elektronických komunikací

Název tématu: **Ověření funkce modemu PLC na sdělovacích vedeních**

Pokyny pro vypracování:

Prostudujte dosud publikované standardy pro úzkopásmovou komunikaci PLC. Analyzujte vlastnosti jednotlivých technologií a popište rozdíly mezi nimi. Seznamte se s funkcí a nastavením vývojového kitu od firmy TI dle standardu NB-PLC G3 a PRIME. Ověřte a zhodnoťte mezní parametry komunikace na klasických sdělovacích vedeních za přítomnosti uměle generovaného rušení a šumu za různých podmínek a pro různé přenosové módy.

Seznam odborné literatury:

- [1] Doporučení ITU-T G.9902 (10/2012), Narrowband orthogonal frequency division multiplexing power line communication transceivers for ITU-T G.hnem networks. Dostupné na: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.9902-201210-I/en> [on-line].
- [2] Doporučení ITU-T G.9903 (02/2014), Narrowband orthogonal frequency division multiplexing power line communication transceivers for G3-PLC networks. Dostupné na: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.9903-201402-I/en> [on-line].
- [3] Doporučení ITU-T G.9904 (10/2012), Narrowband orthogonal frequency division multiplexing power line communication transceivers for PRIME networks. Dostupné na: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.9904/en> [on-line].
- [4] SKRÁŠEK, T.: Úzkopásmová PLC komunikace se standardy G3-PLC, PRIME a IEEE-1901.2. Diplomová práce. VUT Brno. 2015.
- [5] Firemní dokumentace Texas Instruments.

Vedoucí: doc.Ing. Jiří Vodrážka, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

prof. Ing. Boris Šimák, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 3. 12. 2015

Anotace:

Tato diplomová práce je věnována standardům pro úzkopásmovou PLC komunikaci. Teoretická část se zabývá nejprve úvodem do problematiky a stručným popisem širokopásmových PLC technologií. V druhé části jsou popsány dostupné úzkopásmové PLC standardy se zaměřením na fyzickou a spojovou vrstvu OSI modelu. Pozornost je věnována zejména G3-PLC, PRIME a G.hnem standardu. V praktické části jsou vyhodnoceny různé varianty měření pro standard G3-PLC. Pro měření byl využit vývojový kit od firmy Texas Instruments TMDSPLCKIT-V3. Cílem práce je teoretické a praktické porovnání jednotlivých standardů mezi sebou a určení mezních parametrů komunikace.

Klíčová slova: G3-PLC, PRIME, G.hnem, G.hn, IEEE 1901.2, IEEE 1901, PLC, úzkopásmové PLC modemy, Texas Instruments, komunikace po nízkonapětovém vedení

Summary:

This master thesis deals with narrowband Power Line Communication (PLC) recommendations. The first section of the theoretical part describes introduction for PLC systems and briefly describes broadband PLC standards. The second section of the theoretical part deals with narrowband PLC recommendations with focus on physical and data link layer of OSI model. Standards G3-PLC, PRIME and G.hnem are described more into details. The practical part of the thesis contains results from the different types of executed measurements made for G3-PLC recommendation. The developer's kit Texas Instruments TMDSPLCKIT-V3 was used for measurements. The main objective of this work is to compare narrowband PLC systems based on both measurement results and theoretical values and determine communication limit parameters.

Index terms: G3-PLC, PRIME, G.hnem, G.hn, IEEE 1901.2, IEEE 1901, PLC, narrowband power line communication (PLC) modems, Texas Instruments

Poděkování:

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Jiřímu Vodrážkovi Ph.D. za jeho čas při vedení této práce, poskytnuté odborné rady a připomínky.

Obsah

1. Úvod	1
2. Systémy PLC	2
2.1 Pásma použití PLC.....	2
Širokopásmové BPL technologie.....	3
3. Doporučení ITU-T G.hn	3
3.1. G.hn architektura	3
3.2. Fyzická vrstva ITU-T G.hn.....	5
3.2.1. Odolnost proti chybám.....	6
3.2.2. Struktura rámce.....	6
3.3. Spojová vrstva.....	6
3.3.1. Zabezpečení.....	8
4. IEEE 1901.....	9
4.1. Přístupová část sítě.....	9
4.2. Adresace.....	10
4.3. Komunikace konec-konec.....	10
4.4. Synchronizace hodin.....	10
4.5. Vnitřní přeposílání zpráv.....	11
4.6. Režim spánku.....	13
4.7. Alokace šířky pásma.....	13
4.8. Centralizované TDMA.....	14
4.9. Distribuované TDMA.....	15
4.10. Přístupový mechanismus.....	15
5. Porovnání IEEE 1901 a G.hn.....	17
5.1. Přístup k mediu.....	17
5.2. QoS podpora.....	17
5.3. Dávkový mód.....	17
Úzkopásmové PLC technologie.....	19
6. Standard G3-PLC.....	19
6.1. Architektura.....	19
6.2. Fyzická vrstva.....	20
6.2.1. Struktura rámce	21
6.2.2. Záhloví FCH.....	22
6.2.3. Scrambler.....	23
6.2.4. Korekce chyb FEC.....	24
6.2.5. Konvoluční kodér.....	24
6.2.6. Prokladač (Interleaver).....	25
6.2.7. Mapování pro DBPSK/DQPSK/D8PSK.....	27
6.2.8. Preemfáze ve frekvenční oblasti.....	28
6.2.9. OFDM modulace.....	29
6.2.10. Windowing.....	29
6.2.11. Tónová maska.....	30
6.3. Spojová vrstva.....	30
6.3.1. Priorita dat.....	31
6.3.2. ARQ (Automatic Repeat Request).....	32
6.3.3. Segmentace.....	32
6.3.4. Potvrzování v rámci spojové vrstvy.....	32
6.3.5. Struktura rámce MAC.....	33
6.3.6. Směrování paketů.....	34
6.3.7. Přiřazení krátké adresy.....	37

6.4. Ověření totožnosti a bezpečnostní mechanismus.....	38
7. PRIME.....	40
7.1. Fyzická vrstva.....	40
7.1.1. Parametry fyzické vrstvy.....	41
7.1.2. Pilotní nosné.....	42
7.1.3. Záhloví fyzické vrstvy.....	43
7.1.4. Konvoluční kodér.....	43
7.1.5. Modulace.....	44
7.1.6. Cyklická předpona.....	44
7.2. Spojová vrstva.....	44
7.2.1. Adresace.....	46
7.2.2. Příklad přiřazení adresy.....	47
7.2.3. Přístup na kanál.....	49
7.2.4. Interval pro Beacon zprávy.....	50
7.2.5. Alokace beacon slotu.....	50
7.2.6. SCP interval.....	50
7.2.7. CFP interval.....	51
7.2.8. Sledování přepínačů.....	51
7.2.9. Přepínání.....	51
7.2.10. Typy MAC PDU.....	53
7.2.11. MAC kontrolní pakety.....	56
7.2.12. Popis jednotlivých procesů.....	57
7.2.13. Přeposílání ARQ.....	63
7.2.14. Konvergenční vrstva.....	64
7.2.15. CPCS podvrstva.....	64
7.2.16. NULL SSCS podvrstva.....	65
7.2.17. IPv4 SSCS podvrstva.....	65
7.2.18. IEC 61334-4-32 SSCS podvrstva.....	65
7.2.19. IPv6 SSCS podvrstva.....	65
7.2.20. Aktualizace firmware.....	66
7.3. Zabezpečení.....	66
8. ITU-T G.hnem.....	68
8.1. Doména.....	69
8.2. Kvalita služeb QoS.....	70
8.3. Fyzická vrstva.....	70
8.3.1. PCS podvrstva.....	71
8.3.2. PMA podvrstva.....	72
8.3.3. PMD podvrstva.....	73
8.3.4. Preambule.....	74
8.3.5. Odhad kanálových symbolů (CES).....	75
8.4. Spojová vrstva.....	75
8.4.1. APC podvrstva.....	76
8.4.2. LLC podvrstva.....	76
8.4.3. MAC podvrstva.....	78
8.4.4. Adresace.....	80
8.4.5. Průběh komunikace mezi uzly.....	81
8.4.6. Beacon zprávy.....	81
8.4.7. Formát beacon zprávy.....	82
8.4.8. Správní rovina.....	83
8.4.9. Nastavení domény.....	83
8.5. Zabezpečení.....	83
9. IEEE 1901.2.....	84

10. Praktická část.....	86
10.1. Aplikace Zero Configuration GUI.....	87
10.2. První fáze měření G3.....	89
10.3. Druhá fáze měření G3.....	94
10.3.1. Trasa o délce 6,9 km bez odboček.....	95
10.3.2. Trasa o délce 6,9 km s odbočkami.....	98
10.3.3. Trasa pro pásmo CENELEC B a CENELEC BC.....	101
10.4. Třetí fáze měření G3.....	104
10.4.1. Měření s AWGN.....	104
10.4.2. Měření s úzkopásmovým rušením.....	107
10.4.3. Měření s impulsním rušením.....	108
11. Závěr.....	111
12. Literatura.....	113
13. Seznam obrázků.....	116
14. Seznam tabulek.....	119
15. Seznam použitých zkratk.....	120

1. Úvod

S příchodem nových telekomunikačních technologií je stále větší potřeba jejich zavedení do energetického odvětví. Pro odlehčení a automatizování procesů se telekomunikační technologie, a to zejména datová infrastruktura, hodí pro vzdálené odečítání dat z elektroměrů. Systémy využívající těchto technologií se nazývají AMI (*Advanced Metering Infrastructure*). Dále je možné tuto technologii používat pro domácí a přístupové sítě uživatelů.

Komunikace využívající silové vedení je vhodným kandidátem pro domácí sítě, protože není třeba zavádět novou infrastrukturu pro přenos dat. Nicméně pro vysokorychlostní přenos dat je nutné vyřešit určité unikátní překážky, které tento způsob přináší. Jeden z příkladů je fakt, že elektrická vedení jsou náchylná vůči elektromagnetickému rušení. Vodiče jsou dimenzovány na přenos signálů o nízkých frekvencích. Charakteristiky kanálu a jeho parametry se mění s frekvencí, časem a změnami v energetické síti. Kanál obsahuje šum na pozadí, impulsní rušení, úzkopásmové rušení a odrazy. Pokrok v oblasti modulací, přenosu signálu a kódování však umožnil přenos dat na těchto typech medií.

Hlavní motivací pro implementaci těchto systémů je úspora nákladů na vyslání technika, větší konzistence a dostupnost záznamů, dále pak možnost ovládat některé prvky v distribuční soustavě na dálku. S těmito potřebami se dále váže větší informovanost zákazníků ohledně jejich spotřeby energie, regulace zdrojů v období nízké či vysoké poptávky.

Rozvržení diplomové práce

První část obsahuje stručný úvod a rozdělení jednotlivých technologií a přehled existujících technologií.

Druhá část se zabývá širokopásmovými technologiemi PLC. Rozebírané technologie jsou G.hn a IEEE 1901. Na konci kapitoly je provedeno srovnání obou standardů.

Třetí část se zabývá rozbohem úzkopásmových technologií G3-PLC, PRIME, G.hnem a IEEE 1901.2.

Poslední část práce řeší praktické měření a následné vyhodnocení měření a porovnání úzkopásmových technologií mezi sebou.

2. Systémy PLC

V praxi rozdělujeme PLC (*Power line Communication*) systémy na dva typy:

- Úzkopásmové NB-PLC (Prime, G3-PLC, IEEE 1901.2, G.hnem)
- Širokopásmové BPL (G.hn, IEE 1901)

Největší rozdíl mezi těmito systémy je šířka pásma, použité nosné frekvence a přenosové rychlosti. Úzkopásmové PLC většinou využívají frekvence pod 500 kHz a jsou více zatížené rušením. Širokopásmové PLC systémy používají frekvence v rozmezí 2-30 MHz. Širokopásmové PLC systémy jsou klíčové pro aplikace distribučních společností, automatizace domácností či vysokorychlostní přenos uživatelských dat. Například pro odečet elektroměrů je zapotřebí, aby nedocházelo ke ztrátám dat. Ze širšího pásma nosných frekvencí je snadnější vybrat kvalitnější nosnou frekvenci. Oba dva typy PLC systémů podporují různé typy modulací a ARQ (*Automatic Repeat Request*) mechanismus, čímž je docíleno potřebné robustnosti systému.

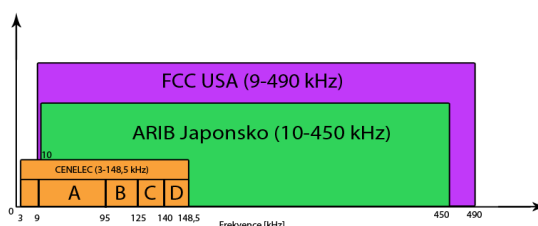
2.1 Pásma použití PLC

Rozsah kmitočtů, na kterém je možné používat PLC systémy, je určen legislativně a v každé zemi či oblasti různě. Rozdělení pásem pro Evropu je dáno dokumentem CENELEC EN 50065. Pro USA se jedná o opatření FCC (*Federal Communications Commission*) a pro Japonsko ARIB (*Association of Radio Industries and Businesses*).

V Evropě je možné používat PLC technologii na kmitočtech od 3 do 148,5 kHz a pásmo je rozděleno na čtyři kategorie. Dále je definována maximální úroveň signálu. Norma FCC pro USA specifikuje frekvence použití od 10 do 490 kHz a pro Japonsko je rozsah kmitočtů od 10 do 450 kHz.

Pásmo	Frekvence [kHz]	Účel
	3-9	Určeno pro dodavatele elektrické energie
A	9-95	Určeno pro dodavatele elektrické energie popř. Odběratele
B	95-125	Určeno pro privátní účely odběratelů
C	125-140	Určeno pro privátní účely odběratelů (nutný protokol přístupu)
D	140-148,5	Určeno pro privátní účely odběratelů

Tab. 1: Rozdělení pásem CENELEC



Obr. 1: Zobrazení jednotlivých pásem

Širokopásmové BPL technologie

3. Doporučení ITU-T G.hn

Jedná se o rodinu specifikací postupně vznikajících na půdě Mezinárodní telekomunikační unie (doporučení ITU-T řady G.996x). Primárním cílem jsou standardy pro domácí sítě, zejména obytné domy, malé kanceláře či veřejná místa zahrnující jak silové rozvody, tak telefonní přípojky či koaxiální kabely, s cílem dosažení přenosové rychlosti 1 Gbit/s.

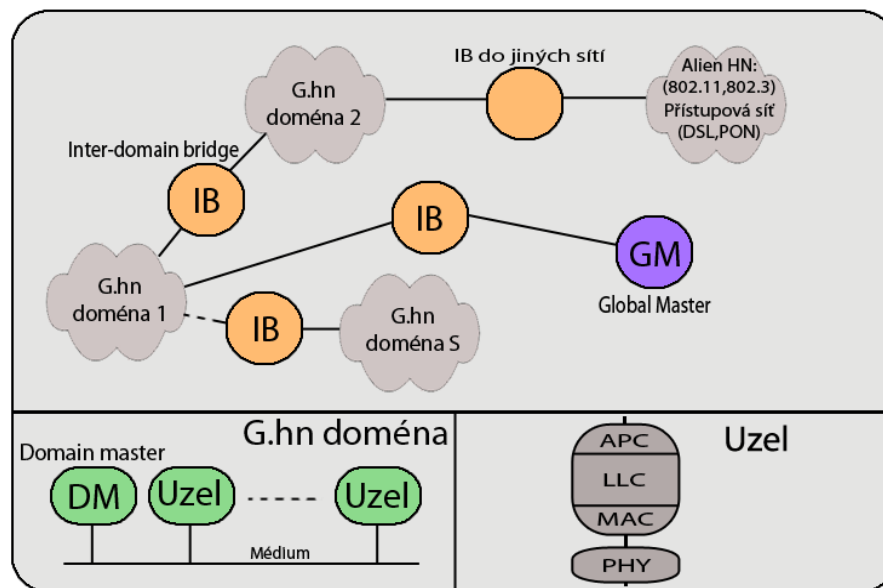
Motivací je řešit sjednocení různých specifikací pro domácí sítě, jako je IEEE 1901, HomePlug, HomePlug AV2, MoCA (*Coax Alliance*) na úrovni jednoho zařízení, kde je možné zvolit typ připojení. Takto vytvořená síť může obsahovat až 250 uzlů. Doporučení definuje několik profilů pro adresování aplikací s rozdílnou mírou implementace. Zařízení využívající vyšší profil je schopné poskytnout uživateli vysokou míru propustnosti a také funkce pro správu. Nízko-profilová zařízení slouží k automatizaci domácnosti a jsou charakteristická nízkou propustností a pouze základními funkcemi pro správu. Ze své podstaty a požadované šířky pásma se jedná o širokopásmový systém BPL (*Broadband Power Line*) pracující v pásmu jednotek až desítek MHz.

3.1. G.hn architektura

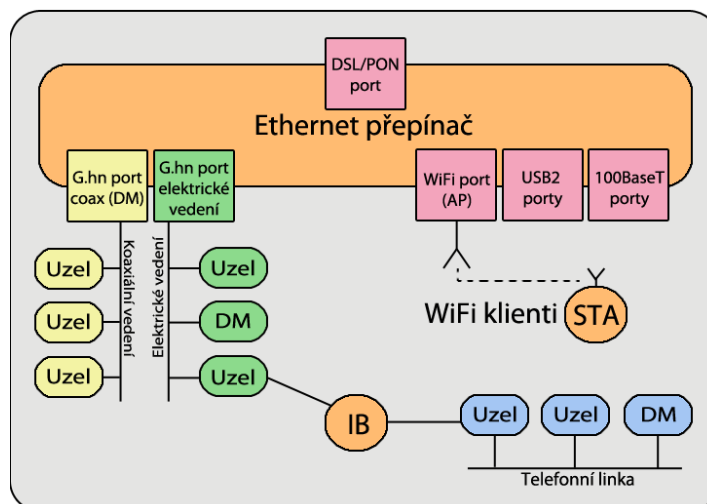
Síť G.hn se skládá z jedné nebo více domén. Veškeré uzly, které mohou mezi sebou přímo komunikovat, tvoří jednu doménu. Je možné vytvořit až 16 jednotlivých domén. Mezi jednotlivými doménami nevzniká interference až na přeslechy mezi vodiči, které jsou umístěny v těsné blízkosti. Jeden z uzlů je vždy hlavní a nazývá se DM (*Domain Master*). Ten kontroluje akce všech ostatních uzlů v doméně jako je například:

- rezervace šířky pásma
- registrace
- přístup a ostatní servisní funkce

V případě selhání DM se jím stane jiný uzel v doméně. DM koordinuje čas vysílání pro jednotlivé uzly, a to z toho důvodu, aby nenastávaly kolize a interference. Na jedné infrastruktuře je také možné provozovat dvě různé domény a to tak, že každá operuje v jiném pásmu frekvencí. Jednotlivé domény jsou propojeny pomocí IB (*Interdomain Bridge*). IB je zařízení, které dovoluje přenos informací a dat mezi připojenými doménami. Každou z domén je také možné propojit do jiných metalických vedení (DSL, PLC Access atd.) nebo na bezdrátové spoje.



Obr. 2: Model G.hn sítě, členění domén a protokolový model uzlu



Obr. 3: Propojení G.hn sítě [1]

Síť obsahuje tři domény: koaxiální doménu, telefonní vedení a silové vedení, z nichž doména je řízena svým DM. Přes přepínač je možná komunikace do WLAN, Ethernetu apod. Komunikace mezi jednotlivými doménami je odbavována pomocí Inter-domain Bridge a komunikace mimo síť je možná pomocí standardních přepínačů či směrovačů s příslušnými porty. Uzly v doméně mohou komunikovat přímo, anebo skrze jiný uzel, takzvaný DAP (*Domain Access Point*). Komunikace těchto skrytých uzlů s DM probíhá pomocí DM-proxy uzlu, který je určen hlavním DM. Koordinaci mezi doménami zajišťuje GM (*Global Master*). Toto zařízení sbírá statistiky z domén a externích entit určených ke správě. Dále získává potřebné parametry z každé domény, jako je např. časování, plán šířky pásma atd. GM komunikuje s DM a ten veškeré parametry přeposílá na každý uzel v jeho doméně.

3.2. Fyzická vrstva ITU-T G.hn

Fyzická vrstva G.hn by měla být kompatibilní s IEEE P1905.1, což je jedna ze standardizačních aktivit odehrávajících se v rámci skupiny IEEE 1901. Zde vznikla i specifikace úzkopásmového PLC s označením IEEE P1901.2, která obsahuje módy kompatibilní se specifikacemi PRIME a G3. Fyzická vrstva G.hn (Doporučení ITU-T G.9960) je rozdělena do třech podvrstev:

- Fyzická podvrstva PCS (*Physical Coding Sub-layer*), která je zodpovědná za generování záhlaví fyzické vrstvy.
- Podvrstva PMA (*Physical Medium Attachment*), jež je zodpovědná za skramblování a zabezpečení FEC.
- Podvrstva závislá na médiu PMD (*Physical Medium Dependent*), která je zodpovědná za alokaci bitů a OFDM modulaci.

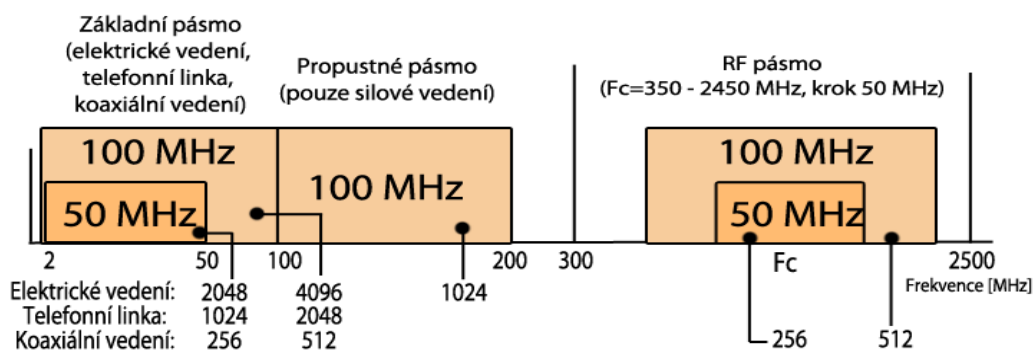
Fyzická vrstva využívá OFDM modulaci s více nosnými a QAM dílčí modulace na subkanálech s počtem stavů až 4096-QAM. Je možné nastavovat jednotlivé parametry pro jednotlivá přenosová média. Parametry jsou následující:

- Počet nosných: $N=2^n$ kde $n=8, \dots, 12$
- Rozteč subkanálů: $F_{sc} = 2^k \times 24,41$ kHz kde $k=0, 1, \dots, 4$
- Centrální frekvence F_c
- Velikost okna

Pro BPL variantu se používá rozteč subkanálů 24 kHz.

G.hn definuje celkem tři frekvenční pásma, a to:

- Základní pásmo
- Propustné pásmo
- RF pásmo



Obr. 4: Frekvenční pásma pro různé typy medií a počet subkanálů pro jednotlivá média [1]

Pro každé médium a frekvenční pásmo je definována pouze jedna skupina OFDM parametrů, což znamená, že překrývající se pásma používají stejné rozteče subkanálů. Dále je specifikována standardní struktura záhlaví fyzické vrstvy a preamble. Tyto dvě vlastnosti

zajišťují interoperabilitu. Počet subkanálů je závislý na typu použitého média a je zobrazen na obrázku 4. Pro cyklický prefix CP je možné vybrat z osmy volitelných hodnot velikosti ($[k \times N/32]$ kde $k=1,2,\dots,8$).

Klíčovou vlastností pro možnost provozovat škálovatelnou OFDM modulaci, kde počet nosných je vždy mocninou dvou na různých typech media, je aproximace zpoždění RMS-DS (*Root Mean Square Delay Spread*). Jeden typ ze tří různých medií je násobkem jiného o takovou hodnotu, která je velmi blízká mocnině dvou. Z této vlastnosti vyplývá možnost upravovat délku CP či počet nosných OFDM a provozovat tento systém na všech typech medií [1]. Pro zajištění spolehlivosti a možnosti pokrýt velký počet účastníků je nutné určit nejhorší možné zpoždění RMS-DS. Z měření [2] byly určeny tyto hodnoty:

- Silové vedení: 1,75 μ s
- Telefonní vedení: 0,39 μ s
- Koaxiální vedení: 46 μ s

Standard G.hn implementuje bitovou alokaci, kterou je možné flexibilně vyjednat mezi vysílací stranou a přijímací stranou pro každé spojení podle aktuální hodnoty SNR. Je možné volit z rozsahu 1 až 12 bitů na subkanál.

3.2.1. Odolnost proti chybám

Pro zajištění odolnosti vůči chybám se využívá FEC kódu, konkrétně QC-LDPC (*Quasi-Cyclic Low Density Parity Check*) kód. Tento kód je definován v doporučení IEEE 802.16e, neboli WiMAX, a je možné ho provozovat v pěti kódových poměrech (1/2, 2/3, 5/6, 16/18 a 20/21) s dvojí velikostí bloků (120 a 540 bajtů). Pro první tři kódové poměry jsou použity tři paritní matice a pro zbylé dva kódové poměry se využívá metody „děrování“ (*Puncturing*) kódového poměru 5/6. Metoda spočívá v tom, že z určeného základního kódového poměru (v G.hn případě 5/6) jsou vypuštěny některé bity z výstupu kodéru. Tyto bity jsou vypuštěny pomocí puncturing matice. Díky této technice poté vznikne kódový poměr m/n. Kombinace mechanismu FEC a schopnosti dynamické bitové alokace, je vhodnou variantou pro přenosové medium s vysokým stupněm ztrátovosti dat, jako je například silové vedení, protože umožňuje optimalizovat přenos dat až do hodnot 10^{-2} blokové chybovosti (*Block Error Rate*). Dekódování LDPC je založeno na Belief-Propagation algoritmu, který je možné vrstvit pro dosažení větší propustnosti.

3.2.2. Struktura rámce

Rámec se skládá z preamble, záhlaví a datové části. Preamble je rozdělena na tři sekce S1-S2, každá z nich se skládá z N_s symbolů. Sekce S2 je stejná jako sekce S1, pouze invertovaná, což slouží k rozpoznání začátku rámce. Záhlaví obsahuje veškeré parametry spojené s obsahem např. bitovou alokaci, ochranný interval a FEC parametry. Záhlaví je jednotné na všech typech média z důvodu zajištění interoperability a snadné detekce záhlaví i na silně zarušených spojích. Datová část obsahuje jedno nebo více kódových slov FEC, z nichž každé nese segment dat a CRC část pro detekci chyb a následné selektivní přeposlání.

3.3. Spojová vrstva

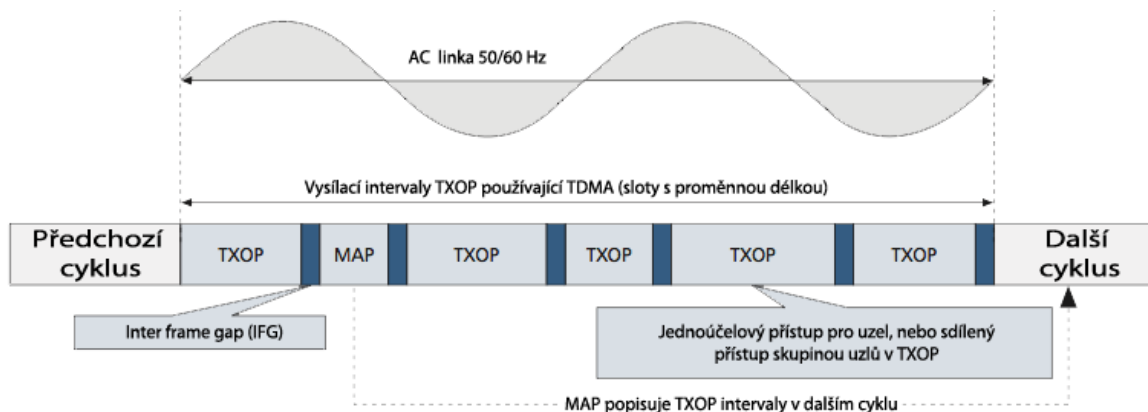
Spojová vrstva G.hn (Doporučení ITU-T G.9961) je rozdělena také do tří podvrstev:

- Vrstva přizpůsobení aplikačního protokolu APC (*Application Protocol Convergence*) přebírá rámce (obvykle ve formátu Ethernet) a zapouzdří je do datových jednotek

APDU (*APC Protocol Data Unit*). Maximální délka každé APDU je 214 bajtů.

- Vrstva logického spoje LLC (*Logical Link Control*) je zodpovědná za šifrování, sdružování či segmentaci datových jednotek, přeposílání metodou ARQ. Zajišťuje přenos datových jednotek i mezi uzly, které spolu nejsou přímo spojeny.
- Vrstva přístupu k médiu MAC (*Medium Access Control*).

Vysílání dat je v doméně koordinované pomocí DM a synchronizované s MAC cyklem. Jedná se o synchronizovaný přístup k médiu. MAC cyklus lze synchronizovat se sítí, což pomáhá vypořádat se s časově proměnnou odezvou kanálů a šumu, který je způsoben připojováním elektrických zařízení do sítě. Cyklus je rozdělen na časové intervaly, ve kterých DM přiřazuje jednotlivým uzlům v doméně možnost pro vysílání TXOP (*Transmission Opportunity*). Minimálně jeden TXOP interval je použit na odeslání MAP (*Media Access Plan*) rámce. Tento rámec nese informaci o časové hranici TXOP intervalu po dobu jednoho či více MAC cyklů. Další TXOP jsou přiřazovány uzlům, které chtějí vysílat data. Veškeré uzly v doméně jsou synchronizovány s MAC cyklem, zpracovávají MAP rámce a vysílají pouze v pro ně přiřazený TXOP interval. Kolizím je předcházeno pomocí těchto intervalů, jež zohledňují typ a délku TXOP pro jednotlivé uzly na základě požadavku uzlu a dostupné šířky pásma. Nicméně plán TXOP intervalů se může měnit v závislosti na charakteristice vedení, aplikaci nebo změně počtu uzlů v síti.

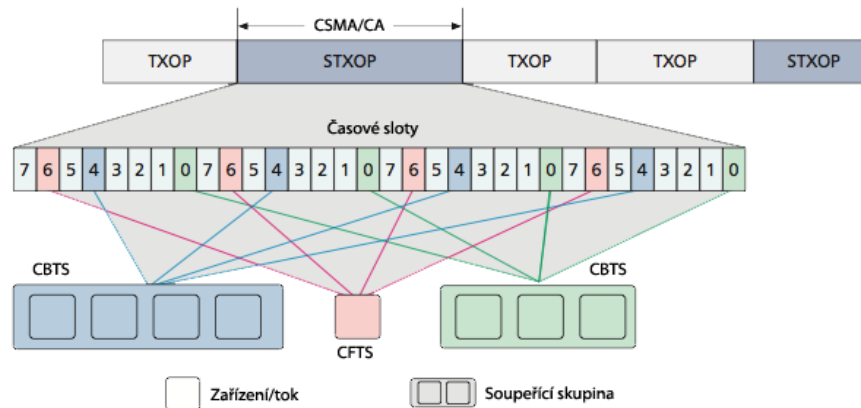


Obr. 5: MAC cyklus ITU-T G.hn [6]

Jsou definovány 3 typy TXOP intervalu:

- **CFTXOP (*Connection Free TXOP*)**: založen čistě na TDMA (*Time Division Media Access*) přístupu, kde pouze jeden uzel může komunikovat v daný interval a je určen pro aplikace s pevnou šířkou pásma a aplikace vyžadující QoS (*Quality Of Service*) jako je například streaming videa či hudby.
- **STXOP (*Shared TXOP*)**: zde je implementován mechanismus CSMA/CA (*Carrier Sense Medium Access/ Collision Avoidance*) pro využití u aplikací s proměnnou šířkou pásma, zde je kladen důraz na QoS, nicméně ne tak striktní jako u streamování videa. Příkladem aplikací je VoIP či online hry. Jeden STXOP je sdílený pro několik uzlů a je rozdělen na krátké úseky TS (*Time Slot*), z nichž každý TS je přiřazen určitému uzlu pro vyslání dat s příslušnou prioritou. Pokud má uzel připravena data s příslušnou prioritou, pošle je v daný TS. V opačném případě je TS přeskočen a neposílají se žádná data. Uzel, který má přiřazený TS, jako další monitoruje medium a čeká, dokud

není medium volné. DM určuje, v jakém slotu má jaká stanice vysílat. Struktura STXOP intervalu se dělí na CFTS (*Connection Free Time Slot*), CBTS (*Connection-Based Time Slot*) a RCBTS (*Registration CBTS*). STXOP může obsahovat pouze jeden z příslušných druhů TS, anebo oba dva typy. Registrační RCBTS je určen pouze pro registraci. Protože TS může být sdílený mezi několika stanicemi, stanice na základě backoff časovače počká náhodný čas a poté vysílá. Struktura STXOP intervalu je na následujícím obrázku 6.



Obr. 6: Rozdělení STXOP intervalu [6]

- **CBTXOP(Connection-Based TXOP):** V tomto režimu se bere v potaz prioritizace rámců, a je určen pro best effort služby s různou úrovní priority. Zde je TXOP rozdělen tak, že na začátku každý uzel indikuje prioritizaci dat, kterou má připravenou k odeslání pomocí prioritizace PRS. PRS vybere rámec s největší prioritizací a pouze takové uzly, které chtějí posílat tyto rámce mohou vysílat a ostatní uzly musejí čekat na další časový úsek, kde dochází k rozhodování. Pravděpodobnost kolize mezi dvěma uzly je snížena náhodným výběrem vysílacího okamžiku v příslušném časovém intervalu. Od začátku každého intervalu veškeré uzly monitorují aktivitu na médiu a pokud je detekována aktivita, uzel pošle data v dalším intervalu.

Pro zlepšení funkce naslouchání nosné je záhlaví každého rámce vybavené polem, které indikuje délku a dále jsou zde použity RTS (*Request To Send*) a CTS (*Clear To Send*) zprávy. Pro zvýšení spolehlivosti se používá mechanismus ARQ.

3.3.1. Zabezpečení

G.hn standard pojednává o dvou hrozbách z hlediska úniku informací a dělí je na interní a externí, nicméně tyto hrozby jsou společné pro všechny PLC systémy využívající pro přenos dat sdílené medium. Externí hrozba je taková, kdy útočník je schopen odposlouchávat komunikaci v síti, a přitom do této sítě nepatří. Interní hrozba nastává, pokud je útočník přímo uživatelem dané sítě. Dále také v případě skrytých uzlů, kdy informace prochází přes jiný uzel který ji přeposílá, je možné provést Man-In-The-Middle útok. Doporučení G.hn podporuje koncept přeposílání datových jednotek (*relays*), ve které jedno zařízení může přijmout zprávu a doručit ji na jiný, vzdálenější uzel. Aby byla zajištěna bezpečnost i v těchto situacích, G.hn specifikuje šifrování konec-konec, což znamená, že mezilehlá stanice nemůže data dešifrovat ani pozměnit. Pro zabezpečení informací byl zvolen mechanismus CCM (*Counter Cipher Mode with Block Chaining Message Authentication Code Protocol*) s šifrováním AES 128 bitů. Při komunikaci je přiřazen každému páru unikátní šifrovací klíč podle ITU-T X.1035,

který ostatní uzly neznají. To zajišťuje ověření a důvěryhodnost dat.

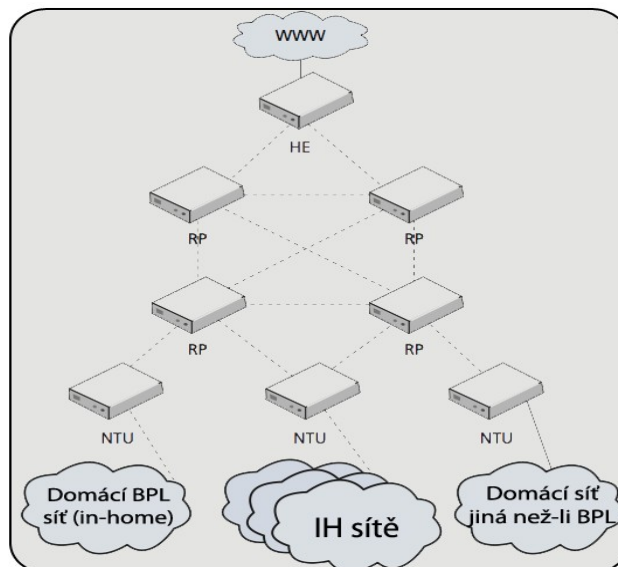
4. IEEE 1901

Tento standard obsahuje specifikace pro domácí síť a také pro automatizaci domácnosti, včetně smart grid aplikací. Domácí síť (*in-home*) je charakterizována malými vzdálenostmi mezi uzly, a topologie je většinou tvaru hvězdy nebo stromové struktury. Není zde třeba opakovačů a celá síť je vlastněna a spravována jedním uživatelem.

U přístupové síť je z hlediska technologie nutné přizpůsobit standardy a zařízení, aby byla co nejvíce flexibilní a to z důvodu, že přístupová síť je velice rozmanitá z hlediska počtu stanic a topologie. Dalším aspektem je dynamičnost této části sítě z hlediska počtu uživatelů a umístění koncových stanic. Samotná síť může být po určitém čase také proměnná z důvodu aktivací a deaktivací elektrických přepínačů. Dalším problémem u přístupových elektrických sítí může být externí interference, která má neblahý vliv na použitelnou šířku pásma. Z tohoto důvodu je nutné definovat protokolový model, který je schopen se dynamicky přizpůsobovat a pokryje širší škálu případů.

4.1. Přístupová část sítě

Přístupová část sítě definovaná ve standardu IEEE 1901, má buňkový charakter, kde buňka je skupina uzlů či stanic, která jsou pod správou pouze jedné stanice. Správa je prováděna přímo pomocí SW a zahrnuje také konfiguraci jednotlivých síťových prvků.



Obr. 7: Přístupová část dle standardu IEEE 1901 [5]

Na Obr. 7 je znázorněna struktura přístupové části sítě. Čárkované spojení zastupuje elektrické vedení a plné spoje zase ostatní klasická media pro přenos dat. Uzel HE (*Head End Station*) spravuje příslušnou buňku a připojuje přístupovou síť k páteřní. Dalším prvkem jsou opakovače RP (*Repeating Station*), které mají za úkol přenos dat a regeneraci signálu na trase. Posledním prvkem jsou zde NTU (*Network Termination Unit*) stanice, což jsou také opakovače, které jsou navíc schopné přeposílat data mezi danou buňkou a externí sítí, jež může fungovat na principu BPL nebo na jiném konvenčním způsobu, jako je Wifi nebo Ethernet. Komunikace a odesílání dat probíhá tak, že například v IH síti je připojen počítač,

který posílá data nejprve na NTU, NTU je pak dále posílá do silového vedení a poté, co data dorazí do HE, kde jsou směrována do internetu (WWW na obr. 7).

4.2. Adresace

HE obsahuje krátkou unikátní síťovou adresu SNID (*Short Network Identification*). SNID může adresovat maximálně šedesát tři sousedních sítí od hodnoty 0x01 do 0x3F, kde 0x00 je rezervována pro neasociované stanice. Každé SNID jednoznačně rozlišuje přístupové buňky od sebe. Každá nově připojená stanice nejprve začne hledat přístupovou buňku, se kterou je možná asociace a použije SNID k zjištění sousedů. Potom co je stanice již připojena pod určité HE, hledá pomocí SNID ostatní sousední buňky a zjišťuje, zda je možné zlepšit konektivitu přepojením na jinou buňku. Pokud stanice nemá přímou viditelnost na HE, využije opakovače RP jako proxy server pro připojení k HE. Po ukončení procesu asociace, HE alokuje nové stanici 12-ti bitovou adresu TEI (*Terminal Entity Identification*). Tyto dvě adresy dohromady, tedy SNID+TEI, tvoří unikátní adresu stanice, pomocí které je možná komunikace. Adresa TEI podporuje existenci až 4000 stanic v jedné přístupové síti. TEI je dále použita jako základní identifikační nástroj pro aplikace vyšší vrstvy. U tohoto standardu se zařízení neidentifikují pomocí MAC (*Medium Access Control*) adres, a to zejména z důvodu ušetření místa v záhlaví. V záhlaví IEEE 1901 standardu se používá zdrojová a cílová adresa TEI a SNID o velikosti 30 bitů. Dalším aspektem adresování je mechanismus detekce souseda, kde jednotlivé přístupové sítě si mezi sebou vyměňují informace o vysílacím čase, což zajišťuje schopnost koexistence sousedů.

4.3. Komunikace konec-konec

Konec-konec komunikace je definována jako celková cesta mezi koncovými body HE a NTU a to zejména z důvodu možnosti použití opakovačů. Cesta, po které se pakety posílají, je určována pomocí síťové vrstvy. Pro rychlý přenos dat z jednoho konce na druhý se používá dvojího záhlaví.

- Vnější záhlaví: Obsahuje adresy koncových stanic komunikace. Jedná se o konec-konec komunikaci.
- Vnitřní záhlaví: Vytváří se na každém opakovači v závislosti na cestě, směrem k cílové stanici. Jedná se o bod-bod komunikaci.

4.4. Synchronizace hodin

Pro některé aplikace je klíčová synchronizace hodin. Jednou z těchto aplikací je synchronizace hodin fyzické vrstvy, která je potřebná pro možnost komunikaci mezi sousedy, nebo správa pro přiřazování času. U IH (*In-Home*) sítí se stanice, které slyší největší počet ostatních sousedů, stává síťovým správcem a synchronizuje hodiny v síti podle svých hodin, pomocí beacon zpráv. Pokud nějaká ze stanic není schopná přímo dosáhnout a poslouchat hlavní stanici, je některé ze stanic v cestě přiřazena role proxy serveru, která přeposílá beacon zprávy a ostatní informace.

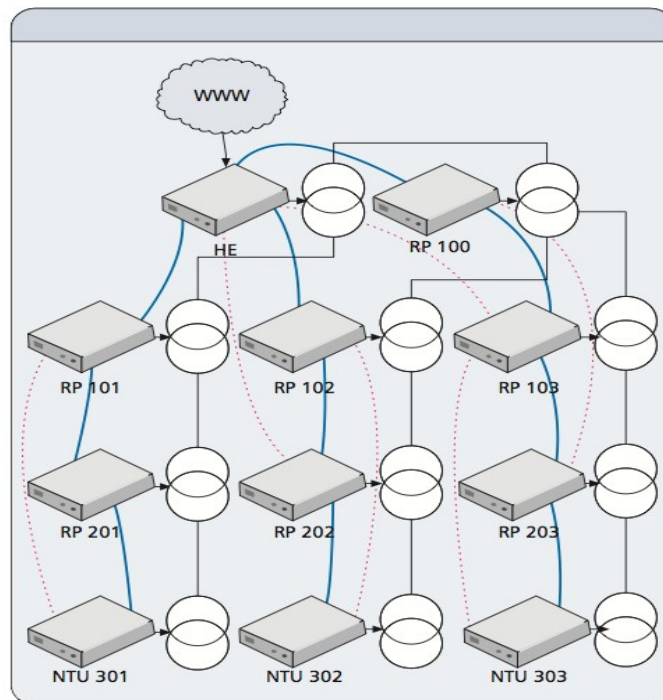
U přístupové sítě je synchronizace prováděna také na centralizované bázi, nicméně proces je poněkud složitější. Synchronizaci udává HE stanice pro všechny stanice buňky a využívá se zde mechanismu skoku. Tento způsob je zde implementován z důvodu větších

vzdáleností mezi hlavní stanicí HE a přístupovými stanicemi, kde je zřejmé, že čas potřebný pro překlenutí vzdálenosti je delší. Skokový mechanismus využívá pro svou funkci 32 bitové hodnoty, která udává hodiny. Tato hodnota se nazývá NTB (*Network Time Base*), je generována HE stanicí a indikuje čas, kdy byla beacon zpráva odeslána. Dalším polem ve zprávě je BL (*Beacon Level*), jenž je vždy na HE stanici nastaven na hodnotu nula. Každá stanice, která přijme tuto zprávu, si nastaví svůj čas podle této hodnoty. Interval mezi beacon zprávami je funkcí maximálního intervalu, při kterém je možné udržet přesný čas v síti. Beacon zprávy jsou také generovány na ostatních stanicích a posílány do sítě. V těchto nových zprávách je obsažen čas odeslání příslušnou stanicí, který je odvozen od vlastních hodin stanice a NTB pole od HE stanice. V poli BL je obsažena hodnota log. 1. Tyto zprávy zpracovávají pouze stanice, které nejsou synchronizovány s HE. Tento proces se opakuje, dokud každá ze stanic v síti nemá synchronizované hodiny podle hodnoty BL. Je zřejmé, že tyto synchronizační zprávy nesmí zahlcovat síť, proto používají robustní modulaci, která však z hlediska množství přenesené informace není efektivní. Počet BL je tedy minimální a jeho hodnota se pohybuje ve stejném řádu jako počet skoků, který by byl použit pro standardní přenos dat.

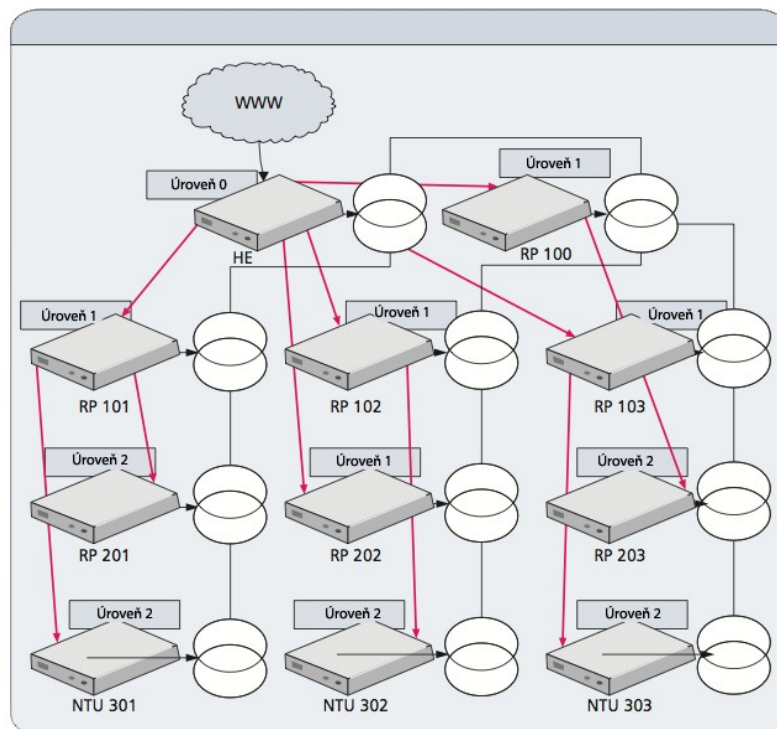
4.5. Vnitřní přeposílání zpráv

Jako u klasické sítě, každá stanice si spravuje svou vlastní směrovací tabulku a rozhoduje se na jejím základě, nezávisle na ostatních. Nicméně je nezbytné, aby byla stanovena cesta směrem k HE z důvodu potřeby komunikace s tímto centrálním prvkem. Pro získání informace, kde v síti leží HE a jak se k němu připojit, stanice naslouchají beacon zprávám, které nesou informaci CLI (*Connection Level Information*). Stanice shromažďuje CLI od jednotlivých beacon zpráv sousedů a porovnává rozdíly mezi nimi, následně vybere optimálního souseda, který bude fungovat jako opakovač a bude přeposílat data na HE. Cesta k HE je u každé stanice neustále optimalizována, což znamená, že celá síť je dynamická. Topologie reaguje na změny kvality spoje a dynamicky mění cesty k HE. Toto řešení je vhodné pro tento typ sítě z hlediska dynamických fyzických změn na síti, které jsou způsobeny otevíráním či zavíráním silových okruhů. Stromová struktura vytvořená na základě beacon zpráv se obecně odlišuje od struktury, která je zformována pro synchronizaci, protože pro synchronizaci je klíčové, aby stanice byla schopná přijímat beacon informace. Oproti tomu pro strukturu zformovanou pro směrování je klíčové najít cesty s maximální šířkou pásma, nízkou chybovostí a vysokým SNR.

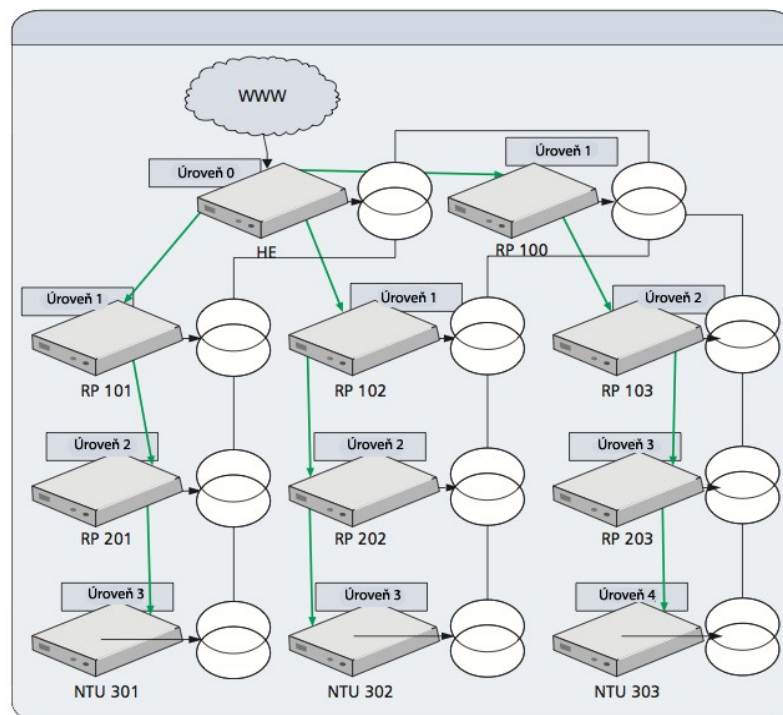
Na obrázcích 8, 9 a 10 je názorně zobrazena stromová struktura BL a směrování. Bod propojení je zobrazen jako dvě kružnice, které se protínají. Tímto je značen fakt, že se jedná o silové vedení. První obrázek demonstruje fyzickou topologii přístupové sítě, kde HE má se sousedními stanicemi RP100 a RP101 dobré spojení (plná modrá křivka) a se sousedy RP103 a RP202 se špatnou kvalitou spojení (čárkovaná červená křivka). Stanice RP103 a RP202 mají dostačující spojení pro možnost synchronizace, ale už nevyhovují pro přenos dat. Další dva obrázky znázorňují dva typy síťového stromu (směrování a synchronizace). První obrázek ukazuje strukturu pro synchronizaci, kde hlavním požadavkem je pouze příjem beacon zpráv a není kladen důraz na výkonnost. Druhý strom je vytvořen naopak na požadavku co nejlepší výkonnosti. Každá stanice je také označena za pomoci BL úrovně. Z hlediska odlišných nároků na stromovou strukturu je zřejmé, že úrovně zařízení jsou v obou typech struktur odlišné.



Obr. 8: Fyzická topologie přístupové buňky [5]



Obr. 9: Synchronizační stromová struktura [5]



Obr. 10: Směrovací stromová struktura [5]

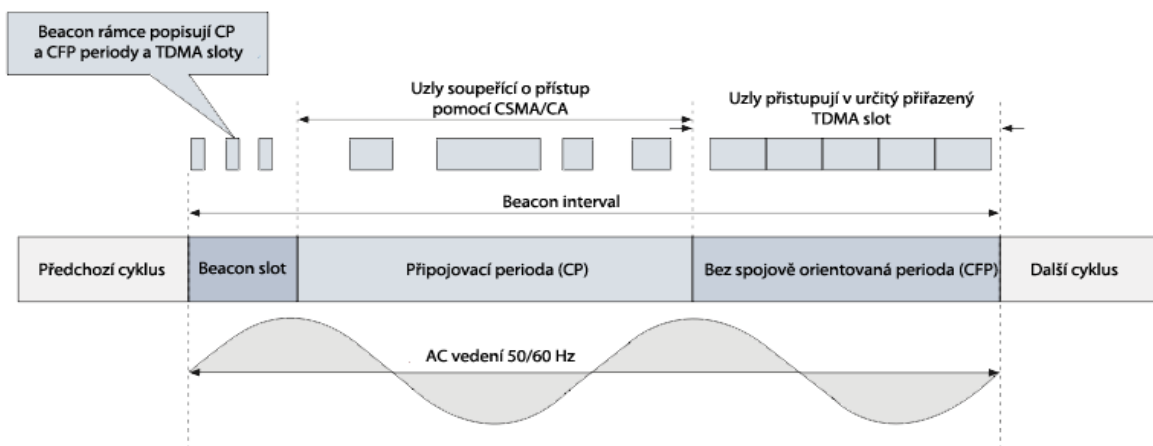
4.6. Režim spánku

Při představě, že se přístupové sítě skládají ze stovek až tisíců uzlů a zároveň tento uzel odebírá zhruba 1W/h, je zřejmé, že je potřeba velké množství energie. Z tohoto důvodu byl implementován režim spánku. Překážkou pro zavedení tohoto režimu u přístupových sítí je skutečnost, že mnohdy jsou stanice od sebe poměrně vzdáleny, což spolu se zpožděním komplikuje plánování intervalu, ve kterém zařízení spí. Proto je režim spánku založen na hierarchickém modelu, aby bylo možné zajistit spolehlivost a dostupnost. Režim spánku začíná na HE a postupně se dostává na RP a koncové stanice v podobném stylu jako u synchronizace. Stanice však před tím, než jde spát, vyšle beacon zprávu, která obsahuje informaci o době trvání spánku. Stanice, jež jsou v hierarchii pod uzlem, který vyslal zprávu s informací o spánku, si poté uzpůsobí svoji dobu spánku na základě nadřazené stanice. To zajišťuje, že hierarchicky níže položené stanice budou včas schopny reagovat na synchronizační zprávy. Dále je možné některým stanicím zakázat spánkový režim. Tato operace se provádí na HE zařízení, které poté rozesílá list stanic, které nemají povolený spánek, opět pomocí beacon zprávy.

4.7. Alokace šířky pásma

Pro širokopásmové přístupové sítě je v dnešní době nejvíce používán MAC protokol CSMA/CA s prioritizací, nicméně v dynamickém prostředí je náročné definovat vztah mezi centrálním a podřízeným prvkem. Dalším problémem u CSMA/CA je to, že mechanismus není deterministický. To znamená, že není garantována šířka pásma nebo zpoždění, což může způsobit problémy u aplikací náchylných na QoS. Pro aplikace, jako jsou smart grid, je

potřebné zajistit přístup k síti s definovanou odezvou. Pro tuto potřebu je v IEEE 1901 zavedena alokace pásma na principu TDMA over CSMA. Zde je celkový čas dělen na regiony. Existují tři základní regiony, z nichž první je určen pro beacon zprávy, druhý pro žádost o přidělení časového slotu a přístup pomocí CSMA/CA a třetí obsahuje časové sloty přidělené pomocí TDMA. Nový MAC cyklus vždy začíná beacon zprávou, v intervalu vymezeném pro beacon zprávy, která obsahuje informaci o čase začátku dalších dvou intervalů. První z těchto intervalů je CP (*Connection Period*). V tomto čase stanice přistupuje k mediu pomocí CSMA/CA metody a žádá o přidělení TDMA slotu. Za příjem a alokaci intervalu je zodpovědný HE. Každá koncová stanice, která chce vysílat a využít TDMA slot, musí požádat o kanál v CP intervalu. Pokud je stanici přidělen TDMA slot, stanice svá data vysílá v tomto čase. Požadavek je založen na úrovni služby, kterou chce aplikace využívat. HE poté rozhoduje, zda přijme žádost a alokuje kanál na základě požadavků koncové stanice a dostupných zdrojů sítě. HE používá dvě metody pro alokaci TDMA slotu. První způsob spočívá v alokaci slotu tak, že HE alokuje potřebný slot pro komunikaci tam a zpět pro veškerá zařízení v cestě. Tato metoda se nazývá centralizované TDMA, což znamená, že HE řídí veškerou alokaci samostatně. Druhý způsob spočívá v delegování povinnosti alokovat slot na RP stanice. Tento postup je označen jako distribuované TDMA a HE pouze dává souhlas RP stanicím, aby samostatně řídily alokaci. Dva způsoby alokace lze provozovat paralelně v jedné buňce. Dokud není ustanoven TDMA kanál, probíhá komunikaci klasickým způsobem podle CSMA.



Obr. 11: Rozdělení MAC cyklu [6]

4.8. Centralizované TDMA

HE je zodpovědný za alokaci slotů v obou směrech pro všechna zařízení v cestě ke koncové stanici, která si vyžádala slot. HE pošle zprávu příslušnému opakovači, kde mu přidělí TDMA slot v závislosti na možnostech buňky. Tento přístup zajišťuje kvalitní synchronizaci v celé cestě až k hraniční stanici. Je možné provést sjednocení několika kanálů do jednoho slotu v závislosti na topologii. Dalším prvkem této alokační metody je dynamické TDMA sdružování. Zde hlavní prvek buňky HE může upravit plán alokace při zahájení, a to z důvodu, že podmínky kanálu a možnosti sítě se dynamicky s časem mění. To je výhodné pro správu většího počtu měřidel AMR (*Automatic Meter Reader*), kde je potřeba vyhnout se kolizi vlivem CSMA. Signalizace pro alokaci je obsažena v beacon zprávách, které se posílají každé dvě sekundy, což znamená, že stejná alokace je opakována každé dvě sekundy. Toto

řešení je zde zavedeno z důvodu podpory náročných datových toků, jako je video streaming, kde je výhodné mít konstantní bitovou rychlost. Tato vlastnost však není výhodná u sítě, kde je velký počet ARM zařízení, protože dochází k plýtvání šířky pásma. ARM měřidla většinou posílají pouze krátké zprávy vždy po několika minutách. Není tedy třeba jim věnovat v alokaci slotů takovou pozornost.

4.9. Distribuované TDMA

Při tomto přístupu je HE zodpovědné za alokaci pouze pro sousední stanice. Každý opakovač je pak sám zodpovědný za alokaci podřízeným stanicím na základě své vlastní alokační mapy, která je spravována pomocí informací získaných z beacon zpráv a již přiřazených slotů. Časové sloty jsou alokovány postupně, dokud není kanál kompletní. Výhodou tohoto přístupu je fakt, že alokace probíhá v závislosti na lokálních potřebách a poskytuje schopnost rychlého zotavení v případě kolize při alokaci mezi sousedy, skrytými uzly a sousedními buňkami. Je zřejmé, že tento přístup je také jednodušší pro správu v případě, že dojde ke změně cesty.

4.10. Přístupový mechanismus

Stanice naslouchá nosné před posláním dat, a pokud je medium volné a stanice vyhraje „soutěž“ o medium, okamžitě příslušná data vysílá. Pokud stanice selže při soupeření o kanál, nastaví se náhodný backoff časovač. Po vypršení časovače nebo před tím, než se stanice pokusí znovu o vysílání, se zjišťuje, zda nedošlo někde ke konfliktu. I při tomto mechanismu je stále určitá pravděpodobnost kolize. Úspěšné navázání spojení je indikováno pomocí potvrzovacího ACK rámce. Před posláním dat je možné provozovat mechanismus RTS/CTS z důvodu minimalizace kolize. Pro určení priority dat jsou zavedeny čtyři třídy. Stanice posílá svou prioritu v příslušném časovém intervalu, aby informovala HE o prioritě dat čekajících na odeslání. Jsou vymezeny dva časové intervaly PRS (*Priority Resolution Period*):

- PRS0
- PRS1

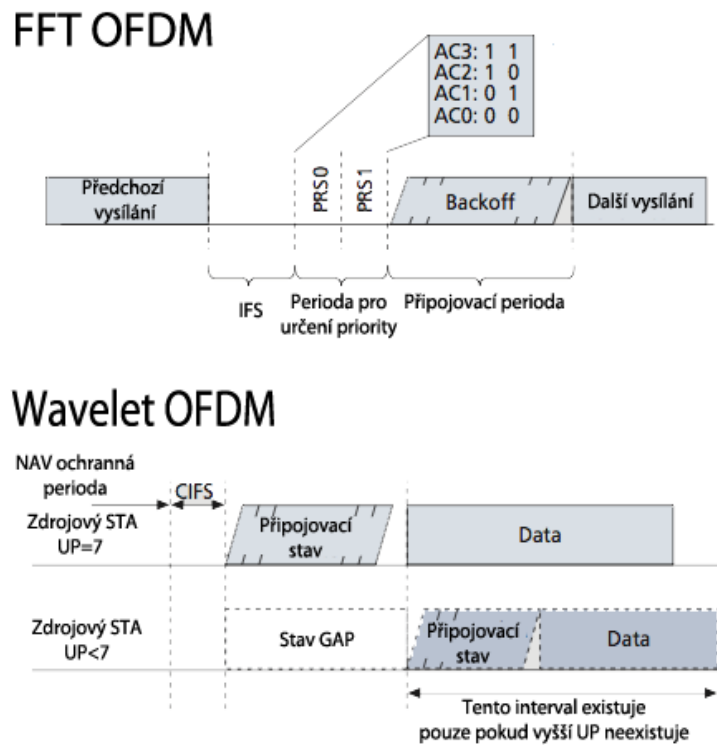
Tyto intervaly následují za odeslanými daty. Největší úroveň priority CA3 je signalizována vysláním symbolu v obou periodách PRS. Díky tomuto principu stanice vědí, zda mohou svá data poslat nebo ne. IEEE 1901 využívá dva typy modulace pro přístup na fyzické medium.

- FFT OFDM PHY
- Wavelet OFDM PHY

Přístup na medium je realizován odlišně pro obě technologie fyzické vrstvy. U první technologie FFT OFDM stanice, které chtějí vysílat, nejprve pošlou svou prioritu v čase PRS. Stanice s nižší prioritou se přepnou do stavu back-off a stanice s nejvyšší prioritou se připojí ke kanálu.

Druhý mechanismus využívá mezery před back-off procedurou. Doba trvání mezery je závislá na prioritě vysílání dané stanice. Tato doba trvání mezery pro stanici s největší prioritou (UP=7) je rovna nule. Stanice, jež prohraje soupeření o kanál, začne svojí back-off proceduru hned po CIFS intervalu. Délka mezery stanice s nižší prioritou je delší než back-off

nadřazené stanice. Dále tato stanice začne svou back-off proceduru, pokud na kanále není detekována stanice s vyšší prioritou, jak znázorňuje obr. 12.



Obr. 12: Spojově orientovaný přístup IEEE 1901 (nahore: FFT OFDM, dole: Wavelet OFDM) [6]

Jak již bylo řečeno, vlivem faktu, že elektrické vedení je sdílené medium, je nutné zajistit bezpečnost komunikace. IEEE 1901 využívá bezpečnostní mechanismus dle IEEE 802.1X společně s CCMP protokolem. Služby poskytované CCMP protokolem jsou následující:

- Důvěryhodnost a integrita dat
- Ověření
- Kontrola přístupu

5. Porovnání IEEE 1901 a G.hn

5.1. Přístup k mediu

V obou standardech je možné poskytovat spojově orientované služby s podporou priorit dat či bez nich. Je tedy možné odlišit různou úroveň kvality služby. Oba protokoly podporují stejnou přístupovou metodu CSMA/CA, kde u ITU-T G.hn standardu je navíc podpora TDMA. Nicméně IEEE 1901 využívá TDMA nad CSMA/CA. Dále každá z technologií používají synchronizační zprávy. IEEE 1901 standard dělí MAC cyklus na tři intervaly, kde první interval je určen pro signalizační beacon zprávy, druhý pro žádost o udělení TDMA slotu a třetí obsahuje TDMA sloty pro příslušné stanice. V jednom MAC cyklu je minimálně jedna perioda CP.

G.hn řeší přístup k mediu poněkud jiným způsobem. První odlišností je, že se nepoužívají žádné signalizační zprávy beacon. Pro popis MAC cyklu je určena rámeček MAP (*Medium Access Plan*), který je obsažen v jednom TXOP intervalu. DM stanice vyšle minimálně jeden MAP rámeček za jeden MAC cyklus. V tomto rámci je obsažena informace o TXOP intervalech pro jeden či více následujících cyklů. K TXOP intervalu je možné přistupovat pomocí TDMA nebo pomocí CSMA/CA. MAC cyklus obsahuje více TXOP intervalů, k nimž je možné přistupovat pomocí CSMA/CA.

5.2. QoS podpora

IEEE 1901 podporuje osm úrovní služeb definovaných v IEEE 802.1D. Stanice s malým zpožděním či s nepatrným fázovým chvěním má prioritní přístup v CFP intervalu. Stanice může také získat přístup v CP intervalu. Při použití Wavelet MAC přístupu je možné rovnou podporovat osm úrovní QoS. Druhý FFT MAC přístup a G.hn doporučení podporuje pouze čtyři úrovně QoS vlivem 2-bitového PRS.

5.3. Dávkový mód

Silové vedení je obecně medium, které obsahuje velké množství impulsního šumu. Z tohoto důvodu je u obou standardů implementována podpora dávkového režimu, který dovoluje vyslání několika paketů stejné priority při jediném přístupu na medium. Tento režim je podporován na CFP a CP intervalech. Při vysílání dat v dávkovém režimu, záhlaví MAC obsahuje indikátor, zda se jedná o konečný rámeček dávky nebo ne. První rámeček typicky indikuje potvrzovací politiku dávkového režimu. Existují dva způsoby:

- Okamžité ACK potvrzení rámce (na přijatý rámeček se okamžitě odešle ACK rámeček)
- Selektivní SACK potvrzení rámečků (SACK rámeček se odešle až po přijetí posledního rámečku dané dávky)

Dávkový režim v CFP periodě je možné provozovat pouze do konce aktuálního alokovaného časového slotu. V případě CP intervalu je u G.hn možné opět využívat celý STXOP interval, ale u IEEE 1901 je přiřazen stanici určitý čas, po který může dávky vysílat. U obou standardů je implementován také obousměrný dávkový režim.

vlastnosti	IEEE 1901		ITU-T G.hn
	FFT-PHY	Wavelet-PHY	
přístupový kanál			
základní technologie	CSMA/CA	CSMA/CA	TDMA, CSMA/CA
Spojově orientované schéma	CSMA/CA	CSMA/CA	CSMA/CA
RTS/CTS	volitelné	volitelné	volitelné
Priorita přístupu	4	8	4
Virtuální monitorování nosné	Ano	Ano	Ano
Bez-spojově orientované schéma	TDMA	TDMA	TDMA
Persistentní přístup	Ano	Ano	Ano
Administrace přístupu	Beacon	Beacon	MAP
QoS	Podporováno	Podporováno	Podporováno
Bezpečnost			
Bezpečnostní mechanismus	DSNA/RSNA	PSNA/RSNA	AKM
Šifrovací protokol	CCMP	CCMP	CCMP
Dávkový režim	Jedno/Obousměrný	Nepodporováno	Obousměrný
Adresní schéma			
Režimy	Unicast, Multicast, Broadcast	Unicast, Multicast, Broadcast	Unicast, Multicast, Broadcast
Velikost	8-bitů	8-bitů	8-bitů
Agregace, fragmentace a rozložení	Podporováno	Podporováno	Podporováno

Tab. 2: Porovnání vlastností IEEE 1901 a ITU-T G.hn [6]

	ITU-T PLC	IEEE PLC
Fyzická vrstva	OFDM	OFDM/Wavelet
Spojová vrstva	OFDM	OFDM/Wavelet
Cílové médium	Koax, Telefonní linka, Elektrické vedení	Elektrické vedení
Dokumentace	G.hn (ITU-T MAC-G 9961)	IEEE 1901 (MAC,PHY,COEX)
	G.hn (ITU-T PHY-G 9960)	
	G.cx (ITU-T Coexistence 9972)	
	G.hnem (ITU-T G.9902)	

Tab. 3: Porovnání standardizačních organizací [6]

Aplikace	ITU-T	IEEE
Vysokorychlostní širokopásmové přístupové	Není	1901
Vysokorychlostní širokopásmové domácí	G.hn (50/100MHz)	1901
Nízko-rychlostní širokopásmové domácí	G.hn (25MHz)	Není
Nízko-rychlostní úzkopásmové	G.hnem	1901.2

Tab. 4: Oblasti použití PLC standardů [6]

Úzkopásmové PLC technologie

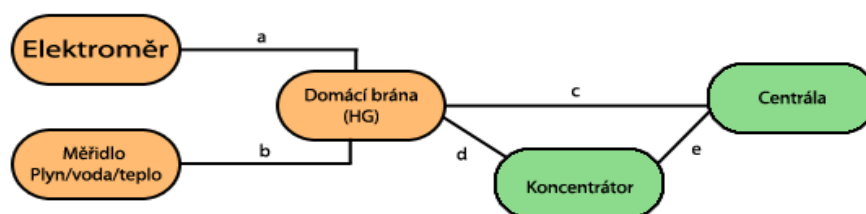
6. Standard G3-PLC

Tento standard byl vyvinut firmou ERDF (*Électricité Réseau Distribution France*) a firmou Maxim Integrated Products a uznán institutem ITU jako standard s označením ITU-T G.9903. Standard obsahuje specifikace pro fyzickou (PHY) a spojovou (MAC) vrstvu při použití OFDM modulace pro frekvence do 500 kHz. Právě použití OFDM modulace a pokročilých kódovacích technik dovoluje přenos i za velice špatných podmínek při zaručení kanálu impulsním šumem, úzkopásmovou interferencí a zpožděním v řádech mikrosekund. PLC standard podporuje komunikaci pro AMI (*Advanced Metering Infrastructure*), komunikaci nutnou pro automatizaci domácnosti a ostatní SmartGrid aplikace. Standard je dále určen pro domácí síť HAN (*Home Area Network*).

Spojová vrstva MAC implementuje specifikace IEEE, které jsou místy rozšířeny a přizpůsobeny. Specifikace počítá již primárně s nasazením IPv6. Aplikační vrstva zahrnuje dvě třídy úloh: měření založené na DLMS/COSEM a aplikace k řízení elektroměru, regulaci odběru apod.

6.1. Architektura

Jedním ze základních oblastí nasazení tohoto standardu je AMI systém. Většina těchto systémů je založena na jedné základní topologii, která je znázorněna na Obr.13.



Obr. 13: Základní struktura AMI systému

Elektroměry a ostatní senzory (voda, plyn) komunikují s domácí bránou HG (*Home Gateway*), která slouží k propojení jednotlivých měřidel do sítě poskytovatele. Ve většině případů je tato brána zabudována již přímo v elektroměru. Elektroměr je napájen přímo ze sítě, ale ostatní měřidla je třeba napájet například pomocí baterie, což je nutné vzít také v úvahu při výběru vhodného transportního protokolu. Další úsek komunikace se dále dělí na dva způsoby. V prvním scénáři může brána komunikovat přímo s centrálou poskytovatele pomocí internetu nebo v druhém využívá koncentrátor jako prostředníka mezi bránou a centrálou. Brána je obvykle připojena ke koncentrátoru pomocí silového vedení, přes které jsou zároveň s elektřinou přenášeny data, nebo je spojení realizováno bezdrátovou technologií.

6.2. Fyzická vrstva

Blokový diagram OFDM vysílače pro G3-PLC je zobrazen na následujícím Obr 14. Frekvenční pásmo je rozděleno na subkanály. Subkanály si lze představit jako jednotlivé subnosné frekvence, které jsou modulovány PSK modulací a vzájemně mezi nimi nedochází k interferenci (jsou ortogonální). Dále je použito prokládání, konvoluční a Reed-Solomonovo kódování, které přidává redundantní bity sloužící k opravě chyb či rekonstrukci ztracených bitů. OFDM pro vytvoření signálu využívá inverzní Furierovy transformace (IFFT). K OFDM symbolu je poté přidána cyklická předpona na počátek každého bloku generovaného IFFT. Délka cyklické předpony je vybrána tak, aby nedocházelo k interferenci vlivem skupinového zpoždění mezi po sobě jdoucími symboly. Dále je využit Windowing, který snižuje únik vysílaného signálu mimo specifikované pásmo.

Stanice provádějí odhad kanálu pro určení parametrů vedení a případné následné úpravy vlastností vysílání. Na základě kvality přijatého signálu může přijímač navrhnout modulační schéma pro vysílač. V následujících paketech se poté mezi přijímačem a vysílačem bude toto schéma využívat. Systém je dále schopen určit subnosné frekvence s nedostatečným SNR, a pokud se tak stane, nevysílá na těchto kanálech žádná data.

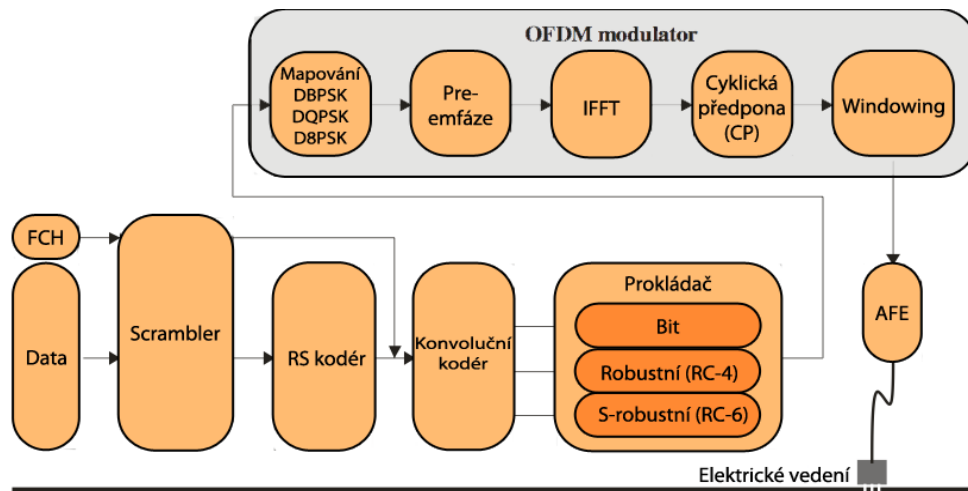
G3-PLC využívá diferenciální modulace (DBPSK, DQPSK a D8PSK), což zjednodušuje návrh zařízení oproti systémům s koherentní modulací (BPSK, QPSK, 8-PSK nebo QAM). Výhoda těchto modulací spočívá v detekování fáze subnosné současného symbolu na základě sousedního symbolu. Nicméně standard dovoluje použití i těchto koherentních modulací. Maximální počet subnosných frekvencí je stanoven na 128, což znamená, že rozměr IFFT je 256. Rozteč mezi kanály je: 1,5625 / 4,6875 kHz (F_s/N) CENELEC/FCC, kde

- F_s = vzorkovací frekvence
- N = velikost IFFT

Vlivem nepřesnosti vzorkovací frekvence může docházet k mezi-kanálové interferenci ICI (*Inter-Carrier Interference*). Díky této příčině je možné použít 36 subnosných pro plán CENELEC-A, 16 subnosných pro plán CENELEC-B a 72 subnosných pro plán FCC.

Systém pracuje ve dvou režimech: normální/robustní. Robustní mód lze provozovat ve dvou režimech (RC4 a RC6). Za použití normálního režimu se FEC oprava chyb skládá z Reed-Solomonova kodéru a konvolučního kodéru a výstup je následně prokládán. Systém také podporuje Reed-Solomonův kód s redundancí 8 nebo 16 bitů. V robustním režimu je systém doplněn o opakovač kódu RC (*Repetition Code*). RC mechanismus zopakuje před prokládáním každý bit v závislosti na zvoleném režimu robustního módu. Nevýhodou robustního módu je fakt, že se snižuje propustnost vlivem redundantní informace.

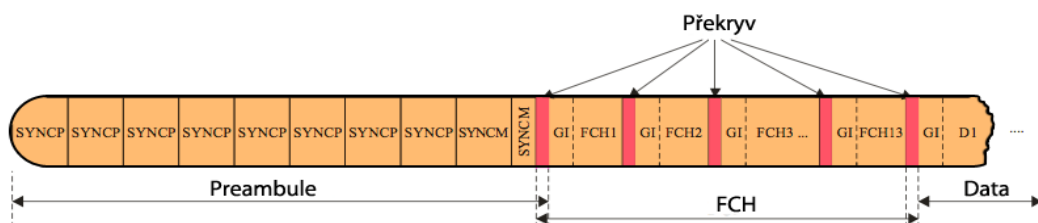
Počet symbolů v jednom rámci fyzické vrstvy je závislý na dvou parametrech, jimiž jsou požadovaná přenosová rychlost a robustnost. Podrobný rozbor počtu symbolů v závislosti na modulaci, rychlosti a robustnosti je obsažen v doporučení ITU-T G.9903.



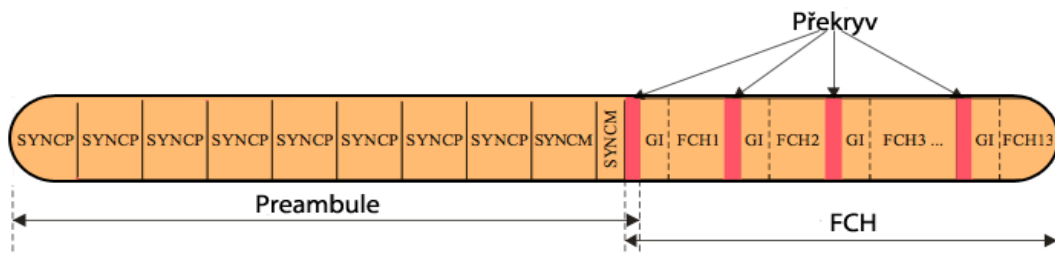
Obr. 14: Blokové schéma vysílače G3-PLC [7]

6.2.1. Struktura rámce

Fyzická vrstva podporuje dva typy rámců. Základní rámec OFDM PHY je zobrazen na následujícím obr 15. Každý rámec začíná sekci preamble, která je použita pro synchronizaci a detekci. Detekce je použita pro kontrolu zisku AGC (*Automatic Gain Control*). Preamble se skládá z osmi symbolů SYNC_P a jeden a půl symbolu SYNC_M, který se liší ve znaménku. Symboly násobené +1 jsou značeny jako SYNC_P a naopak symboly násobené hodnotou -1 jsou interpretovány jako SYNC_M. Cyklická předpona mezi sousedícími symboly není použita. První symbol obsahuje funkci *raised cosine* a poslední půl symbol SYNC_M taktéž. Veškeré symboly preamble by měly mít stejný zisk 3 dB. Za preamble následuje kontrolní záhlaví FCH (*Frame Control Header*), které nese informace o způsobu demodulace dat, typu rámce, délce atd., poté následují data. Fáze FCH je totožná jako u posledního SYNC_P symbolu preamble a první datový symbol má opět stejnou fázi jako poslední FCH symbol. Cyklická předpona je značena jako GI (*Guard Interval*). Fyzická vrstva podporuje potvrzovací rámce ACK/NACK, které se skládají pouze z preamble a FCH jak je znázorněno na obr. 16.



Obr. 15: Struktura datového rámce OFDM PHY [7]



Obr. 16: Struktura potvrzovacího rámce OFDM PHY [7]

6.2.2. Záhlaví FCH

FCH je chráněn standardním CRC5 mechanismem využívající polynom pátého řádu pro CENELEC nebo CRC8 pro FCC. Záhlaví je vysíláno v super robustním módu RC6 nezávisle na typu modulace dat. Kmitočtové plány jsou rozděleny do sub-plánů, což je skupina šesti tónů (frekvencí). Každý bit tónové mapy je spojen s jedním sub-plánem a indikuje, zda příslušná skupina tónů nese data tak, že bit je nastaven do log. 1. Mapu tónů a strukturu rámce pro FCC lze nalézt v [7].

Bajt	Pole	Číslo bitu	Počet bitů celkem	Popis
0	PDC	7 – 0	8	Detekční fázový čítač
1	MOD	7 – 6	2	Typ modulace
	FL	5 – 0	6	délka PHY rámce v symbolech (Počet symbolů/4)
2	rezervováno	7 – 6	2	nastaveno na 0
	TM[5 – 0]	5 – 0	6	Tónová mapa
3	modulační schéma dat	7	1	Diferenciální / koherentní modulace
	DT	6 – 4	3	Zda je vyžadována odpověď
	FCCS	3 – 0 7	4 1	CRC5
4	Konvoluční logické nuly	6 – 1	6	Nuly pro konvoluční kodér

Tab. 5: FCH struktura pro CENELEC plán [7]

- **MOD (Modulation Type):** Pole slouží k určení typu modulace:
 - 0: Robustní režim
 - 1: DBPSK nebo BPSK
 - 2: DQPSK nebo QPSK
 - 3: D8PSK nebo 8-PSK

- **FL (Frame Length):** Udává délku PHY rámce. Výpočet je proveden dle rovnice: $FL = \text{počet symbolů} / 4$
- **TM[5-0] (Tone Map):** Pole tónových map je složeno z pěti bitů, kde jednotlivé mapy jsou značeny TM[0] až TM[5]. V plánu CENELEC-B je tónová mapa TM[5-3] rezervována pro budoucí použití a tyto bity musejí být nastaveny na log. 0.
- **Modulační schéma dat:** Pro výběr, zda se bude používat koherentní (log.1), či diferenciální modulace (log.0).
- **DT (Delimiter Type):** Potvrzování ACK/NACK určuje pole DT. Je možné nastavit tyto hodnoty:
 - 0: Odpověď není požadována
 - 1: Požadována odpověď ACK/NACK
 - 2-7: Rezervováno ITU-T pro budoucí použití

Rámce ACK/NACK mají odlišnou strukturu FCH, která je znázorněna v následující tabulce. Tyto rámce, jak již bylo řečeno, se skládají pouze z preamble a FCH záhlaví.

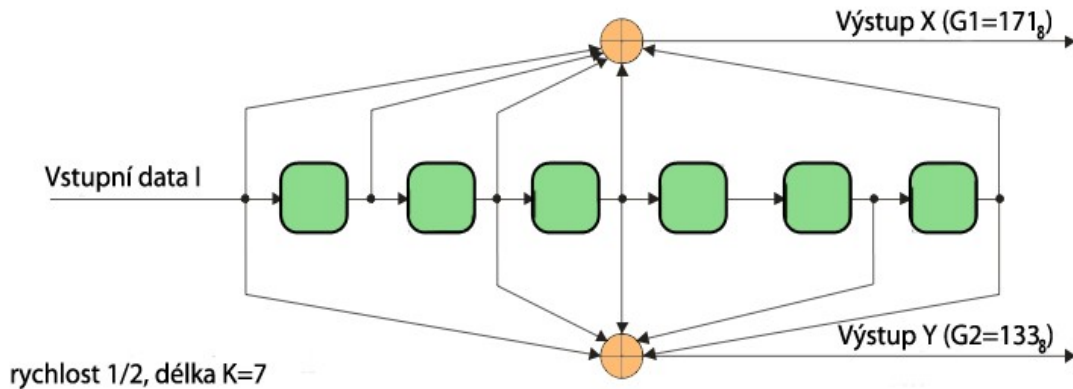
Bajt	Pole	Číslo bitu	Počet bitů celkem	Popis
0	FCS-1	7 – 0	8	MAC FCS [7 – 0]
1	SSCA	7	1	Proti kolizní opatření
	rezervováno ITU-T	6 – 0	7	nastaveno na nuly
2	FCS-2	7 – 0	8	MAC FCS [15 – 8]
3	rezervováno ITU-T	7	1	nastaveno na nuly
	DT	6 – 4	3	výběr ACK/NACK
	FCCS	3 – 0	4	CRC5
4	Konvoluční logické nuly	7	1	
		6 – 1	6	Nuly pro konvoluční kodér

Tab. 6: FCH struktura ACK/NACK záhlaví pro CENELEC [7]

- **SSCA (Subsequent Segment Collision Avoidance):** Pole pro signalizaci dalšího přicházejícího segmentu.
 - 0: Žádný další segment nenásleduje
 - 1: Následuje další segment
- **FCS-1/FCS-2 (Frame Check Sequence):** FCS rámce, který byl přijat a vyžaduje odpověď je uložena v tomto poli. Stanice požadující odpověď poté používá toto pole pro ověření, zda je potvrzení určeno pro ni.
- **DT (Delimiter Type):** Pole informuje, zda se jedná o pozitivní potvrzení ACK či negativní NACK následovně:
 - 0-1: Rezervováno ITU-T
 - 2: ACK
 - 3: NACK
 - 4-7: Rezervováno ITU-T

6.2.3. Scrambler

Scrambler je blok, který zajišťuje pseudonáhodné rozložení dat a tím zabraňuje



Obr. 18: Schéma konvolučního kodéru [7]

Je možné provést rozdělení PSDU na dva stejné bloky. Toto rozdělení se provádí v RS bloku a následné zpracování každého z bloků v konvolučním kodéru probíhá, včetně vyplnění nulami, jako by se jednalo pouze o jeden RS blok dat.

6.2.6. Prokladač (*Interleaver*)

Hlavní funkcí tohoto bloku je ochrana před shlukovými chybami, které postihují několik po sobě jdoucích OFDM symbolů. Dále je to ochrana před úzkopásmovým rušením, které ovlivňuje několik sousedních nosných a tím velké množství symbolů. Prokladač pracuje ve třech režimech provozu, jak již bylo řečeno. V případě robustního módu je každý bit na výstupu z konvolučního kodéru zopakován v závislosti na typu robustního režimu a poté přiveden na vstup prokladače. V režimu RC4 je možné zvolit modulaci DBPSK nebo BPSK v závislosti na zvoleném druhu modulace (diferenciální/koherní) pro datovou část. Super robustní mód je možné použít pouze pro FCH záhlaví bez RS kódování. Podporovaná modulace pro RC6 je pouze DBPSK. Prokládání dat probíhá ve dvou krocích: v prvním z nich je každý **sloupec** prokládací matice posunut o různý počet políček, což zajišťuje ochranu před shlukovými chybami; ve druhém kroku je poté každý **řádek** posunut o různý počet políček, což zajišťuje ochranu proti úzkopásmovému rušení. G3-PLC implementuje dva typy prokladače, a to elementární a blokový.

Elementární prokladač

Permutační matice prokladače se skládá z „m“ sloupců a „n“ řádků. První krok, v němž dochází k posuvu sloupců, se provádí podle rovnice:

$$J_{(i,j)} = (j \times n_j + i \times n_i) \bmod n$$

(1)

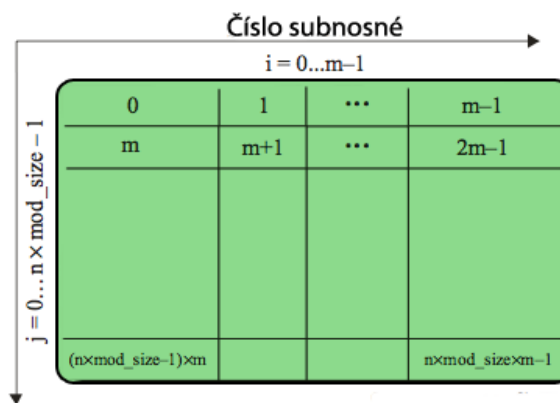
Kde „i“ a „j“ jsou originální bitové pozice na vstupu prokladače a „n“ je celkový počet symbolů. Parametry proložení, neboli posuvu, jsou poté n_j a n_i . Proložená pozice sloupců je poté J . V dalším kroku dochází k posuvu řádku podle rovnice:

$$I_{(i,j)} = (i \times m_i + J \times m_j) \bmod m \tag{2}$$

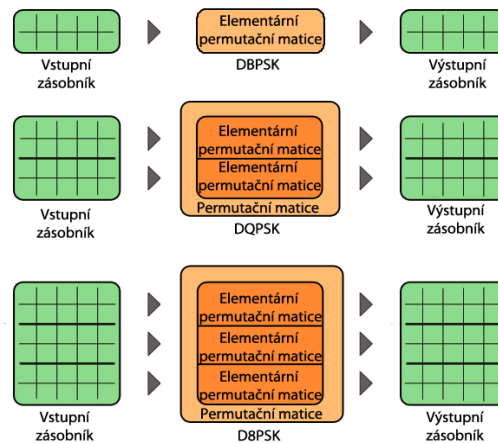
Kde „m“ je počet nosných a m_j a m_i opět parametry posunutí. Datové bity jsou vkládány do vstupního zásobníku řádek po řádku a pro doplnění se používají nuly. Celkový počet symbolů je definován jako:

$$n = \text{ceil}\left(\frac{\text{celkový počet bitů}}{4 \times m \times \text{mod}_s}\right) \times 4 \tag{3}$$

Kde mod_s je počet bitů na konstelační symbol u dané modulace a funkce „ceil“ je zaokrouhlení na horní celou část.



Obr. 19: Matice vstupního zásobníku [7]



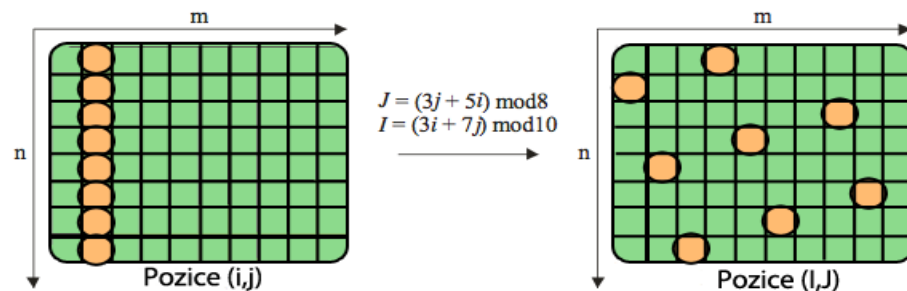
Obr. 20: Permutační matice pro různé modulace [7]

Jakmile je prokládání hotovo, data jsou ukládána do výstupního zásobníku. Pro DBPSK a BPSK modulace se využívá základní matice prokladače a pro ostatní modulace se permutační matice využívá vícekrát, jak lze pozorovat na obr. 20. Po prokládání čtou mapovací funkce modulací výstupní zásobník prokladače řádek po řádku.

Pro názorný příklad necht' $n=8$, $m=10$, $n_i=5$, $n_j=3$, $m_i=3$ a $m_j=7$, musí platit:

- $\text{GCD}^3(m_i, m) = \text{GCD}(m_j, m) = 1$
- $\text{GCD}(n_i, m) = \text{GCD}(n_j, n) = 1$
- $m_i < m_j$
- $n_j < n_i$

Pro danou hodnotu „n“ hodnotou n_j by mělo být první nesoudělné číslo větší než dva. Hodnotou parametru n_i by poté mělo být druhé nesoudělné číslo větší než dva. Stejný postup je aplikován na parametry m_i a m_j . V našem případě nesoudělná čísla k hodnotě 8 jsou: 1,2,3,5,7. Je zřejmé, že hodnoty parametrů n budou 3 a 5.



Obr. 21: Příklad prokládání [7]

V případě blokového režimu je změna pouze ve funkci pro celkový počet symbolů.

$$n = \text{ceil} \left(\frac{\text{celkový počet bitů}}{m \times \text{mod}_s} \right) \times \text{mod}_s$$

(4)

6.2.7. Mapování pro DBPSK/DQPSK/D8PSK

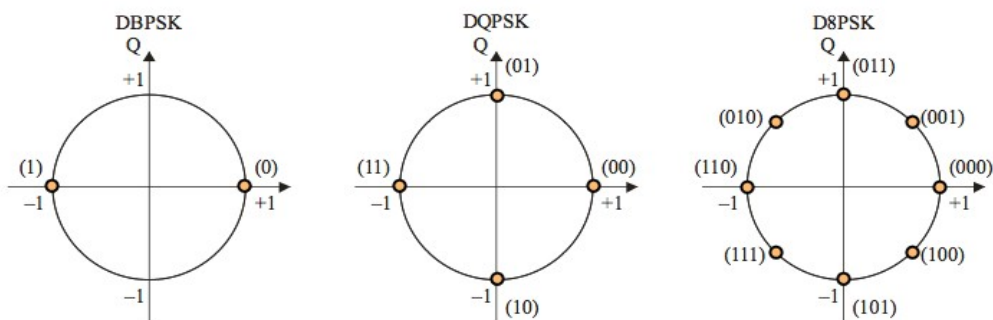
Mapovací blok je zodpovědný za modulování signálu pomocí modulací DBPSK/DQPSK/D8PSK či koherentní variantu těchto modulací a dále za dodržení tónové mapy a masky.

Jako fázová reference je zde použit předchozí symbol na stejné nosné namísto fázového referenčního vektoru. První FCH symbol využívá fázový posuv z posledního symbolu pole SYNCP z preamble. Dále pak první datový symbol využívá posledního symbolu FCH. Mapování dat pro příslušné modulace je uvedeno v následující tabulce, kde ψ_k je „k-tá“ subnosná posledního symbolu.

3 GCD je značka pro největší společný dělitel.

pozn.	modulace	Vstupní bity	výstupní fáze
	DBPSK	0	ψ_k
		1	$\psi_k + \pi$
Bitová posloupnost (X,Y) kde Y je první prokládací matice	DQPSK	00	ψ_k
		01	$\psi_k + \pi/2$
		11	$\psi_k + \pi$
		10	$\psi_k + 3\pi/2$
Bitová posloupnost (X,Y,Z) kde Z je první prokládací matice	D8PSK	000	ψ_k
		001	$\psi_k + \pi/4$
		011	$\psi_k + \pi/2$
		010	$\psi_k + 3\pi/4$
		110	$\psi_k + \pi$
		111	$\psi_k + 5\pi/4$
		101	$\psi_k + 3\pi/2$
		100	$\psi_k + 7\pi/4$

Tab. 7: Dekódovací tabulka pro diferenciální modulace k-té subnosné [7]



Obr. 22: Konstelační diagram diferenciálních modulací [7]

6.2.8. Preemfáze ve frekvenční oblasti

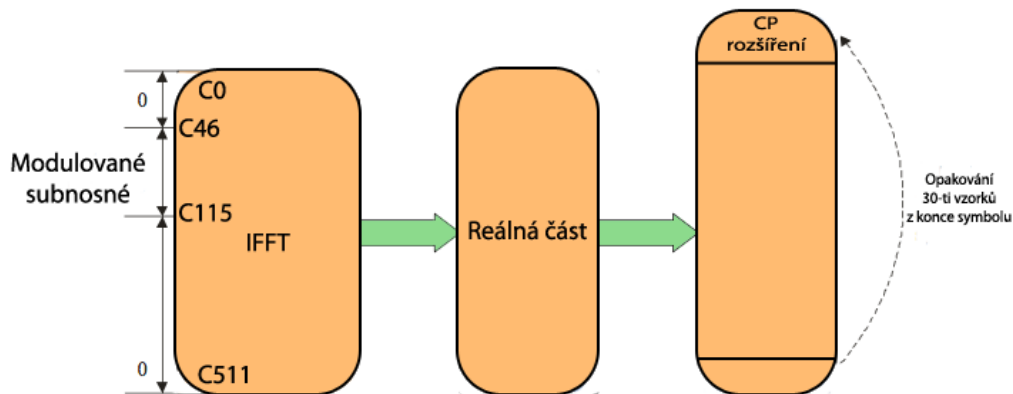
Tento blok umožňuje frekvenční tvarování vysílaného signálu. Blok je možné využít pro spektrální tvarování, kompenzaci frekvenčně závislého útlumu signálu a vysílání signálu přes medium s vysokým stupněm šumu. Je využit pro zdůraznění vyšších modulačních kmitočtů proti nižším kmitočtům. Blokové schéma bloku preemfáze je na následujícím obr. 23.



Obr. 23: Blokové schéma filtru preemfáze [7]

6.2.9. OFDM modulace

První blok provádí inverzní Furierovu transformaci IFFT. Na vstup bloku IFFT přichází vektor komplexních čísel o velikosti 512 symbolů ve frekvenční oblasti. Z výstupních koeficientů IFFT bloku se využije pouze reálná část, která tvoří 256 OFDM slov v časové oblasti. Před tyto slova je ještě v dalším bloku přidána cyklická předpona o délce 30 vzorků. Řešení spočívá v převzetí posledních 30 vzorků výstupu IFFT a jejich následné umístění před symbol. Mechanismus je znázorněn na obr. 24.

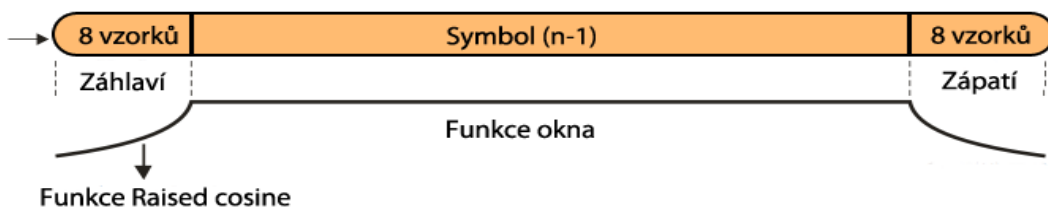


Obr. 24: IFFT výstup/vstup a cyklická přípona [7]

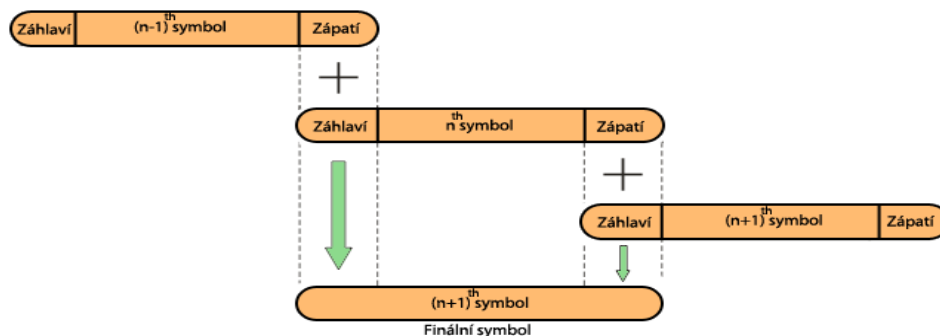
6.2.10. Windowing

Blok je používán pro zlepšení spektrální čistoty a k potlačení postranních pásem signálu. Je využito funkce raised cosine, která je aplikována na veškeré datové symboly. Funkce je aplikována na 8 prvních a posledních vzorků symbolu. Ve zbytku vzorků nabývá funkce hodnoty 1. Konce a začátky (prvních a posledních 8 vzorků) po sobě jdoucích symbolů se překrývají.

Koherentní modulační schéma je uvedeno v [7].



Obr. 25: Funkce raised cosine aplikovaná při windowing proceduře [7]



Obr. 26: Překrývání rámců [7]

6.2.11. Tónová maska

Jedná se o statický parametr definovaný v 72-bitovém atributu *macToneMask* spojové vrstvy. Každý bit nastavený do hodnoty log.1 indikuje přiřazenou frekvenci, která bude použita pro komunikaci, kde nejméně významný bit reprezentuje nejnižší frekvenci CENELEC nebo FCC frekvenčních plánů. Tónová maska je aplikována na preambuli, FCH a data.

Tónová mapa je naopak dynamický adaptivní parametr, který na základě odhadu kanálu obsahuje seznam subnosných, které budou použity pro komunikaci na zařízení. Mapa například obsahuje informaci, které subnosné jsou zatíženy nízkým SNR nebo úniky, a proto pádem se tyto frekvence nebudou využívat pro přenos dat. Tónová mapa je z tohoto důvodu posílána na protější zařízení s informací, jaké hodnoty útlumu či zesílení si má protější zařízení nastavit na jednotlivé subnosné. Zdrojová stanice, respektive její spojová vrstva, žádá o vyslání mapy pomocí nastavení bitu TMR (*Tone Map Response*) v záhlaví spojové vrstvy. Cílová stanice poté provede odhad podmínek kanálu, vybere optimální parametry a pošle TMR zprávu zdrojové stanici. Hlavní motivací tohoto mechanismu je dosažení co možná nejlepší spolehlivosti a propustnosti při různých podmínkách na médiu. Mapa je aplikována pouze na datovou část rámce. V případě robustního režimu jsou veškeré frekvence použity na přenos dat bez ohledu na tónovou mapu.

Na frekvencích, které nenesou žádnou informaci, se vysílají náhodně vygenerovaná data, neboli pseudonáhodná posloupnost. Počet bitů posloupnosti se odvíjí od použité modulace.

Zařízení pracující dle standardu ITU-T G.9903 jsou schopna samostatně odhadnout SNR přijatého signálu a dle toho zvolit využívané subnosné frekvence. Dále jsou zařízení schopna vybrat optimální modulaci a kódový poměr pro zajištění spolehlivosti komunikace na silnoproudém vedení.

6.3. Spojová vrstva

Spojová vrstva pro G3-PLC se skládá ze dvou podvrstev, kde MAC podvrstva je převážně založena na standardu IEEE 802.15.4. Druhá podvrstva se nazývá adaptační a je založena na standardu IRTF RFC 4944. Podrobný popis, jaké části z příslušných dokumentů byly převzaty a jaké upraveny, lze nalézt v [7].

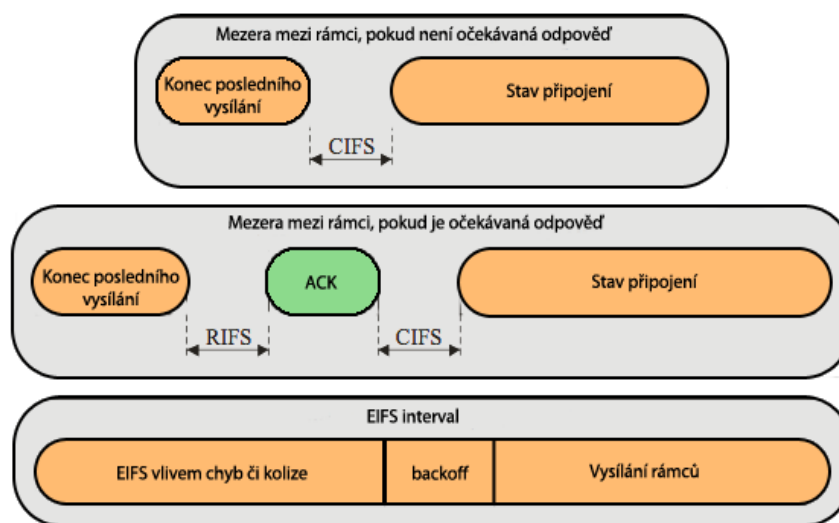
Pro přístup k médiu využívá G3-PLC metodu CSMA/CA s náhodným back-off časovačem. Časovací back-off mechanismus informuje stanice v jakém čase se mají pokusit o vysílání, což snižuje pravděpodobnost kolize. Každé zařízení, které by mohlo vysílat datové rámce, musí počkat na připojovací periodu v závislosti na prioritě rámců a poté začít náhodně dlouhý interval back-off. Pokud se kanál nepoužívá po tomto zpoždovacím mechanismu, stanice vyšle data. Pokud je již kanál využíván po back-off intervalu, stanice musí počkat na další připojovací periodu a celý proces se opakuje znovu.

Základní komponentou CSMA/CA je naslouchání nosné, které se provádí v rámci fyzické vrstvy PCS (*PHY Carrier Sense*), ale i MAC podvrstvy jako virtuální naslouchání nosné VCS (*Virtual Carrier Sense*). VCS mechanismus odhaduje pravděpodobnou dobu obsazení kanálu a je nastaven délkou přijatého paketu nebo dobou, po kterou je nutné počkat na další vysílací okno v případě kolize. Průzkum obsazení kanálu se provádí pomocí PCS na základě detekce preambule. Kolize nastává ve dvou případech:

- Vysílací stanice obdrží jiná data než očekávanou ACK/NACK odpověď.
- Vysílací stanice neobdrží žádnou odpověď, i když ji očekává. Tato událost však může

znamenat i nekvalitní spojení.

G3-PLC využívá CIFS (*Connection Inter-Frame Space*), RIFS (*Response Inter-Frame Space*) a EIFS (*Extended Inter-Frame Space*) intervalů z důvodu doby šíření signálu a jeho následného zpracování. CIFS interval je čekací doba mezi posledním vyslaným rámcem a přípojovací oknem v případě, že není očekávána žádná odpověď. RIFS je doba mezi koncem vysílání rámce a začátkem ACK rámce. Poslední interval EIFS je aplikován v případě, že stanice nemá úplné informace o stavu média. Tato situace nastává při připojení stanice do sítě, nebo v případě přijetí poškozeného rámce. EIFS je mnohonásobně delší, než RIFS a CIFS. Pokud je rámeček přijat a dekodován před vypršením EIFS, tak je zbytek intervalu přeskočen a v následné komunikaci se používají předchozí dva intervaly.

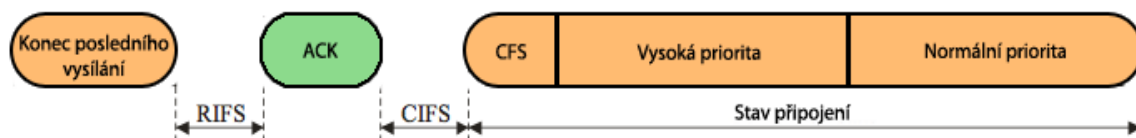


Obr. 27: Znázornění intervalů CIFS/RIFS/EIFS [7]

6.3.1. Priorita dat

Z důvodu snížení náročnosti jsou u G3 uvažovány pouze dvě úrovně priority (normální a vysoká). Priorita se určuje pomocí dvou přípojovacích period v přípojovacím okně. První slot v přípojovacím okně se nazývá CFS (*Connection Free Slot*). V tomto čase se vysílají po sobě jdoucí segmenty rámce bez back-off mechanismu pro prevenci přerušení od ostatních uzlů a zjednodušení procesu rekonstrukce rámce na straně přijímače. Pro využívání CFS je nejprve nutné vyslat první segment dat v normální nebo vysoké přípojovací periodě a zbytek rámců je vysílán v CFS.

Stanice „soutěží“ o připojení v obou přípojovacích periodách. Vzhledem k tomu že interval připojení stanic s vysokou prioritou je před normální přípojovací periodou, stanice s vyšší prioritou jsou připojeny jako první.



Obr. 28: Znázornění přípojovacího okna a jeho částí [7]

6.3.2. ARQ (Automatic Repeat Request)

ARQ je implementováno v závislosti na ACK/NACK potvrzování. ACK je použito pro potvrzení přijatých rámců a NACK pro informování vysílací strany, že pakety byly poškozeny. Pokud vysílací strana nedostane potvrzení do vypršení časovače, předpokládá se, že rámec byl ztracen a přepošle jej v následující připojovací periodě. Pokud není přijato potvrzení po několika pokusech, stanice se může rozhodnout o ukončení příslušné operace. Pokud není požadováno potvrzení, stanice předpokládá, že data byla v pořádku přijata druhou stranou. Je však možné, aby stanice vysílala rámec několikrát pro zvýšení pravděpodobnosti doručení dat. Cílová stanice poté vymaže redundantní kopie rámců v závislosti na čísle segmentu a pořadovém čísle rámce, protože kopie má tyto dvě hodnoty stejné jako originální rámec.

6.3.3. Segmentace

Z důvodu, že G3-PLC standard podporuje mnoho různých modulací a tónových map, počet datových bajtů se v závislosti na tom mění, proto je zde implementována fragmentace na MAC podvrstvě. Pokud je rámec společně se záhlavím veliký a nevejde se do PSDU, je rozdělen na menší segmenty. Tomuto procesu se říká segmentace. Potvrzování a přeposílání rámců probíhá pro každý segment. Každý segment obsahuje FCH a záhlaví MAC. Všechny segmenty mají stejné pořadové číslo a inkrementuje se pouze číslo segmentu. Pokud je nutné provést šifrování dat, provádí se tato procedura před segmentací. Je pouze nutné nastavit příslušnou hodnotu v záhlaví, které signalizuje zašifrovaný obsah. Všechny segmenty musejí mít nastavený informační bit CC (*Connection Control*) v záhlaví, aby bylo možné informovat protějščí stranu o tom, že další segment bude poslán v CFS intervalu. Pouze poslední segment nemá nastaven tento bit. TMR bit je nastavován pouze u posledního segmentu. Pro řízení segmentace je určeno pole Segment Control v MAC záhlaví rámce.

Pokud je přijat ověřovací rámec NACK, stanice přepošle příslušný segment nebo rámec po CIFS intervalu. Přeposílají se jen rámce, které obsahovaly chybu. V případě, že nedojde k potvrzení ACK/NACK, stanice vyšle veškeré segmenty od začátku po EIFS intervalu pomocí CSMA/CA. Aby nedocházelo k problému se skrytým uzlem v intervalu CFS, který je určen pouze pro vysílání segmentů, je v potvrzovacích rámcích zavedeno pole SSCA. Skrytý uzel může začít vysílat segmenty v CFS intervalu, což by vedlo ke kolizi. Protože potvrzovací rámce jsou posílány pomocí broadcastu, každá stanice obdrží tyto rámce a kontroluje hodnotu SSCA. Tato hodnota informuje stanice o skutečnosti, zda budou následovat další segmenty dat v CFS. Rámec, jenž potvrzuje poslední segment, nastavuje SSCA pole na log. 0.



Obr. 29: Znárodnění po sobě jdoucích segmentů dat [7]

6.3.4. Potvrzování v rámci spojové vrstvy

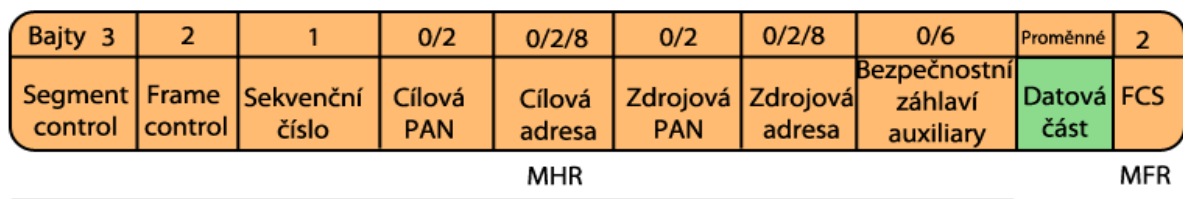
G3-PLC nevyužívá potvrzování v rámci spojové vrstvy. Potvrzování je specifikováno v rámci fyzické vrstvy pomocí záhlaví FCH. Jinými slovy, potvrzování probíhá jen posláním FCH, jak bylo popsáno výše, a jen pokud je nastaveno pole DT v záhlaví FCH. Jestliže je

rámec přijat bez chyb a je vyžadováno potvrzení, je posláno, pouze pokud se cílová stanice a PAN ID (*Personal Area Network ID*) rámce shoduje s adresou příjemce a jeho PAN ID. Při posílání NACK je ještě navíc nastaven SCCA bit proto, aby ostatní stanice nevysílaly během opětovného vysílání dat. Dále NACK není třeba generovat tehdy, když má stanice podezření kolize a přijme poškozený rámec. V tomto případě stanice očekávající potvrzení přejde do stavu kolize, protože žádné potvrzení nepřijde.

Pro ověření, zda je potvrzení určeno pro danou stanici, se porovnává pole FCS z ACK/NACK rámce s polem FCS vyslaného paketu. ACK/NACK rámec je pouze FCH záhlaví na fyzické vrstvě. Potvrzovací FCH obsahuje pole FCS-1 a FCS-2, kde cílová stanice posílající potvrzení vloží hodnotu FCS přijatou v rámci vyžadující odpověď. Hodnota je ukládána ve formátu Little Endian.

Pokud hodnoty souhlasí, je odpověď přijata, a pokud ne, je ignorována, nebo se s ní zachází jako s kolizním stavem. FCS pole obsahuje 16-bitovou CRC hodnotu vypočítanou ze záhlaví spojové vrstvy MHR (*MAC Header*) a datové části.

6.3.5. Struktura rámce MAC



Obr. 30: Struktura obecného MAC rámce [7]

Obecný rámec MAC se skládá z MAC záhlaví, datové části a FCS kontrolního pole. Struktura rámce u G3-PLC je podobná jako v doporučení IEEE 802.15.4. Rámec je však doplněn o pole Segment Control.

Bajt záhlaví	Pole	Číslo bitu	Počet bitů celkem	Popis
0	RES	7-4	4	Rezervováno ITU-T
	TMR	3	1	Požadavek na odeslání tónové mapy
	CC	2	1	Kontrola připojení
	CAP	1	1	Priorita přístupu
	LSF	0	1	Příznak posledního segmentu
1	SC	7-2	6	Číslo segmentu
	SL[9-8]	1-0	2	Délka segmentu MAC rámce
2	SL[7-0]	7-0	8	Délka segmentu MAC rámce

Tab. 8: Rozložení pole Segment Control v záhlaví MAC [7]

- **TMR (*Tone Map Request*):** Toto pole slouží pro vyžádání tónové mapy. Pokud je v log. 1, mapa je požadována.
- **CC (*Connection Control*):** Udává v jaké části připojovacího okna bude poslán další rámec. CFS interval bude použit v případě log. 1. V opačném případě bude použit standardní připojovací interval.

- **CAP (Channel Access Priority):** V log. 0 je nastavena normální priorita dat. V log. 1 je nastavena vysoká priorita dat.
- **LSF (Last Segment Flag):** Signalizuje poslední segment. Poslední segment dat má toto pole nastaveno do log. 1.
- **SC (Segment Count):** Číslo segmentu.
- **SL (Segment Length):** Určuje délku dat bez záhlaví MAC v bajtech pro aktuální segment. Dále se zde nezapočítává vyplněné bajty a FCS.

Existují čtyři typy rámců:

- Datový rámec (001)
- Beacon rámec (000)
- Potvrzovací rámec (řešen na úrovni fyzické vrstvy) (010)
- MAC command rámec (011)

Identifikace typu rámce je závislá na poli Frame Control záhlaví MAC. Rámce MAC command se dělí na dva typy, kde jeden je určen pro požadavek Beacon Request a druhý pro Tone Map Response odpověď. Tato zpráva je generována, pokud je nastaveno pole TMR v záhlaví spojové vrstvy. Zdroj paketů vyžaduje na cílové stanici, aby provedla odhad kanálu a vybrala optimální parametry fyzické vrstvy. Odpověď obsahuje použité tóny, jejich alokaci, režim modulace a parametry výkonu zařízení. Beacon rámec se využívá při asociaci zařízení do sítě.

6.3.6. Směrování paketů

Každé zařízení si udržuje svou tabulku sousedů, která obsahuje informace o všech ostatních zařízeních v dosahu. Tabulka je aktualizována při každém přijetí rámce od souseda nebo přijetím tónové mapy. Informace obsažené v této tabulce jsou například modulační schéma pro komunikaci se sousedem, výkonové zisky, tónové mapy a ostatní parametry [7]. Pokud zařízení přijme rámec se zdrojovou adresou, která není v tabulce sousedů, přidá nový záznam. Tento záznam má nastavené počáteční parametry, jako například robustní mód a diferenciální typ modulace.

Každý broadcast paket obsahuje sekvenční číslo v záhlaví, které je s každým novým broadcastem inkrementováno. Všechny uzly obsahují broadcast tabulku, kterou udržují. Tabulka obsahuje informace o zdrojové adrese, sekvenční číslo a čas platnosti záznamu. Nový záznam do tabulky se přidává, pokud je pole HopsLft v záhlaví mesh větší jak 0⁴.

Nalezení cesty

Nalezení optimální cesty k nějaké cílové stanici může být spuštěno vyšší vrstvou pro účel údržby a správy. Adaptační podvrstva spojové vrstvy vytvoří rámec PREQ (*Path Request Frame*). Tato zpráva nese informace o adrese odesílatele a o cenách linek, přes které zpráva prošla. Pokud stanice v cestě přijme rámec PREQ, přidá svou 16-bitovou adresu a cenu linky. Pokud mezilehlá stanice najde záznam ve své směrovací tabulce, potom je PREQ poslána na next-hop adresu. V případě, že záznam není nalezen, pošle se PREP (*Patch Reply Frame*) zpráva zpět k odesílateli. Proces posílání PREP je obdobný jako u PREQ. Do zprávy se opět přidávají adresy a ceny linek. Pokud není v směrovací tabulce cílová adresa PREP, je rámec zahozen. Cenu linky pro směrování lze počítat z dopředných i zpětných údajů, získaných ze zpráv PREQ a PREP.

4 Více informací v dokumentu IETF RFC 4944 kapitola 5.2.

Mezilehlé uzly mohou provádět opravu cesty v případě, že cílová destinace není ve směrovací tabulce nebo v tabulce sousedů. Pro opravu cesty se používá zpráva RREQ (*Repair Request Frame*) a odpověď RREP (*Repair Reply Frame*). Během tohoto procesu RDP (*Route Discovery Period*) jsou data ukládána do zásobníku.

6LoWPAN protokol

6LoWPAN (*Low-power Personal Area Network*) je specifikace zahrnutá v doporučení IEEE 802.15.4. Jedním z cílů této architektury je minimalizovat lidský zásah v síti. Je však nutné definovat sadu informací LIB (*6LoWPAN Information Base*), pomocí nichž je poté zařízení schopné připojit se do PAN sítě. Pro tento účel je v zařízení implementován specifický protokol nazývaný Bootstrapping protokol. Protokol získává informace ze serveru LBS (*6LoWPAN Bootstrapping Server*) a zahajuje komunikaci v PAN síti. Proces zahrnuje získávání LIB, 16-bitové adresy, IP nastavení či informací ohledně zabezpečení. Protokol funguje s IPv6. 6LoWPAN protokol je zodpovědný za end-to-end komunikace v rámci PLC. Podporuje směrování v MESH režimu.

Základní pojmy:

- **Aktivní průzkum:** Funkce je použita stanicí pro lokalizaci všech koordinátorů vysílajících beacon rámce v dosahu dané stanice a zároveň požaduje vyslání beacon rámce po ostatních stanicích.
- **Sdružování:** Při operaci sdružování se sousedním zařízením je stanici přiřazena dynamická 16-bitová adresa. Po přiřazení této adresy je stanice schopna komunikovat se svou nadřazenou či podřízenou stanicí.
- **Koordinátor:** Zařízení, které řídí síť. Může zahájit synchronizaci pomocí beacon rámců. Jiný název pro toto zařízení je také FFD.
- **ED průzkum:** Tato funkce dovoluje zařízením změřit špičkovou hodnotu energie v každém požadovaném kanálu.
- **FFD (*Full Function Device*):** Zařízení, které implementuje kompletní protokolovou sadu IEEE 802.15.4. Je schopné fungovat jako směrovač pro sdružené sousední stanice.
- **Tabulka sousedů:** Tabulka s informacemi o sousedících stanicích v dosahu daného zařízení.
- **LIB:** Soubor přednastavených informací nezbytných pro připojení stanice do PAN. Informace se dělí na dvě skupiny: PSI (*PAN Specific Information*) informace stejné pro každého zařízení v PAN síti, jako například PAN ID. DSI (*Device Specific Information*) informace, které jsou specifické pro jednotlivá zařízení, jako například adresa.
- **LBD (*6LoWPAN Bootstrapping Device*):** Obyčejné zařízení, které se připojuje do příslušné sítě. LBD nemá žádné informace o síti, kam se připojuje. Obsahuje pouze EUI-64 adresu a v případě zabezpečené sítě také klíč pro připojení.
- **LBS (*6LoWPAN Bootstrapping Server*):** Zařízení obsahující LIB každého zařízení pro Bootstrap proces. IB informace jsou indexovány podle EUI-64 adresy zařízení. Stanice má dva moduly: NAM (*Network Management and Account Module*) a AM (*Authentication Module*). NAM udržuje záznamy LIB pro každé zařízení a AM se zabývá zabezpečením a ověřením LBD.
- **LBA (*6LoWPAN Bootstrapping Agent*):** FFD zařízení, které se již připojilo do PAN a je členem této sítě. Zároveň přijímá LBP zprávy od sousedního LBD a přeposílá je

na server LBS.

- **Otevřená síť 6LoWPAN:** Síť, ke které se může připojit jakékoliv zařízení.
- **Uzavřená síť 6LoWPAN:** Pouze předem definované stanice jsou schopné se k této síti připojit. Selektce se provádí na základě EUI-64 adresy. List povolených zařízení je konfigurován na LBS stanici.
- **Zabezpečená síť 6LoWPAN:** Uzavřená síť, kde je aktivní bezpečnostní mechanismus.
- **PAN ID:** 16-bitový identifikátor, který je jedinečný v PAN síti.
- **Pasivní průzkum:** Stejný jako aktivní průzkum. Rozdíl je v tom, že zařízení nepožaduje vyslání beacon rámce.
- **POS (*Personál Operating Space*):** Oblast dosahu vysílání stanice.
- **RFD (*Reduced Function Device*):** Zařízení, které může být pouze koncové. Neumí směrovat IPv6 pakety na další zařízení.

Bootstrapping proces

Jedná se o proces, při kterém zařízení získává LIB informace od serveru LBS; při tomto procesu se získávají informace pro bezpečnostní mechanismu, provádí se sdružování s příslušnou PAN sítí, nastavuje se 16-bitová adresa a IPv6 adresa pomocí IPv6 prefixu. Provádí se sdružování s ostatními sousedy. Při připojení stanice do sítě se aktivuje průzkum kanálu, zařízení tím získá informace od stanic ve svém POS. Průzkum kanálu může být buď aktivní, nebo pasivní. Během skenování, zařízení přijímá beacon rámce.

LBD vyměňuje zprávy LBP se serverem LBS. Tyto zprávy se posílají přes objevené sousedy LBA. Pro nalezení LBA agenta, stanice vysílá LBA žádost pomocí broadcastu na své sousedy v rozsahu jednoho skoku a čeká na odpověď. Výběr agenta pro přeposílání závisí na minimální ceně linky ke koordinátorovi, krátké adrese nebo na základě kvality linky pro přeposílání beacon rámců.

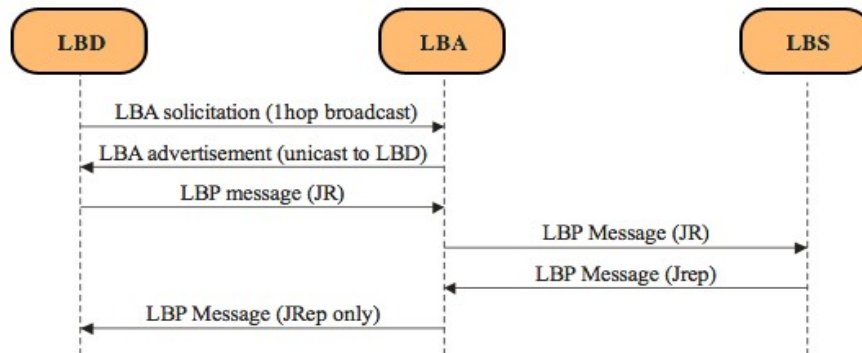
Informace obsažené v LIB:

- **PAN ID:** Identifikace PAN sítě
- **Typ PAN:** Určuje, zda je síť otevřená, uzavřená či zabezpečená
- **LBS adresa:** Adresa serveru
- **Čas připojení:** Čas, kdy by se stanice měla začít pokoušet o připojení do sítě
- **Role zařízení:** Zda se jedná o LBA či ne
- **Krátká adresa:** 16-bitová adresa, unikátní v síti PAN
- **Způsob distribuce krátké adresy:** Zda je adresa přiřazena pomocí LBS nebo pomocí zařízení samotného
- **Specifické informace ostatních stanic:** Pomocí tohoto atributu je možné si mezi LBS a příslušnou stanicí vyměňovat jakékoliv jiné informace, jako například bezpečnostní klíče atd.

LBP (*6LoWPAN Bootstrapping Protocol*)

LBD zařízení posílá zprávy protokolu LBP na agenta LBA, protože nezná cestu k serveru LBS. Agent přeposílá tyto zprávy na server a ten odpovídá jednou nebo více LBP zprávami určenými pro LBA zařízení, protože LBD stanice ještě v tento moment není členem sítě. Pokud je síť zabezpečená a stanice LBD zná přístupové klíče a mechanismus, pošle tyto informace opět na agenta. Po přijetí informací serverem jsou informace přeposlány například

na AAA server a odpověď LBS posílá opět agentovi. LBA sleduje, zda bylo ověření úspěšné, a udržuje tzv. black list se zařízeními, která jsou podezřelá, aby bylo možné zabránit opakování v případě útoku. Ověřovací funkce může přímo provádět LBS nebo AAA server. Po připojení do sítě může zařízení využít protokol LOADng pro nalezení optimální cesty k LBS a dosavadní cestu uložit ve směrovací tabulce jako inicializační. Koordinátor může poslat stanici rámeček, který signalizuje odpojení stanice.



JR = Join Request, JRep = Join Reply

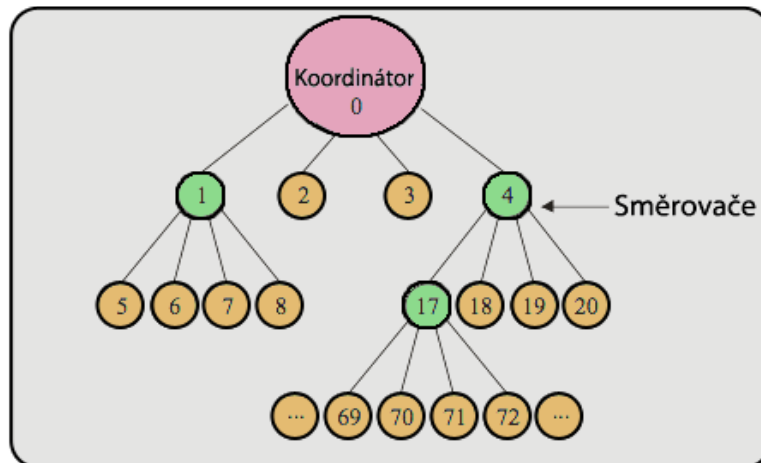
Obr. 31: Průběh LBP zpráv v síti [7]

6.3.7. Přiřazení krátké adresy

LBD stanice si může nastavit svou 16-bitovou adresu, nebo jí může obdržet ze sítě PAN. Adresa musí být unikátní v rámci PAN sítě a může být přiřazena pomocí centralizovaného nebo distribuovaného přístupu. U centralizovaného přístupu LBS přiřadí adresu zařízení buď náhodně vybranou, nebo první dostupnou. U distribuovaného přístupu je adresa přiřazena pomocí LBA a je hierarchická. Adresa se přiřazuje pro první LBD zařízení dle rovnice:

$$FC = MC \times AP + 1 \quad (5)$$

Kde FC je adresa LBD, MC je maximální počet adres, které LBA může přiřadit. AP je adresa LBA. Pokud zařízení LBD není první připojené k LBA, dostává další adresu po poslední přiřazené. Na následujícím obrázku je znázorněna hierarchie adresy.



Obr. 32: Schéma přiřazení krátké adresy [7]

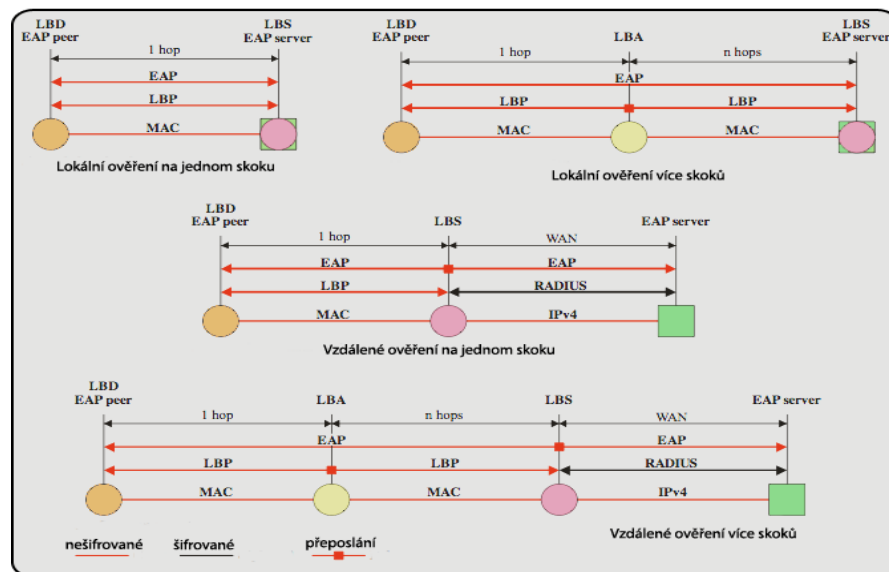
6.4. Ověření totožnosti a bezpečnostní mechanismus

Ověřování je založeno na EAP protokolu dle standardu IETF RFC 3748. Tento protokol je velmi flexibilní a podporuje širokou škálu metod pro různé účely. Každá z těchto metod je charakterizována pověřením (sdílený tajný klíč, certifikát, SIM karty, atd.), svým podpisem a šifrovacím algoritmem. EAP poskytuje LBD zařízení skupinu klíčů. Tyto klíče jsou sdílené na všech ověřených stanicích v síti PAN. Pokud je aktivní ochrana, provádí se kódování a dekódování na každém skoku. Klíče jsou periodicky obnovovány.

Koncová zařízení, která „se chtějí“ připojit do sítě, nejprve procházejí ověřením a také se porovnává, zda nejsou na black listu. Identifikace a ověření zařízení je založeno na dvou parametrech:

- EUI-48 MAC adresa nebo EUI-64 prefix
- 128-bitový sdílený klíč PSK (ověřování je založeno na důkazu, že připojovací strana zná tento klíč)

Identifikace a ověření se provádí při připojení stanice do sítě nebo kdykoliv v průběhu připojení v závislosti na bezpečnostní politice dané sítě.



Obr. 33: Zabezpečení mezi jednotlivými stanicemi [7]

Metoda EAP používaná u G3-PLC je EAP-PSK, kde jsou hlavní cíle:

- **Jednoduchost:** založeno na 128-bitovém sdíleném klíči a šifrovacím algoritmu AES-128
- **Bezpečnost:** EAP je spolehlivý a ověřený způsob zabezpečení
- **Rozšiřitelnost**

Jsou rozlišovány dvě úrovně zabezpečení:

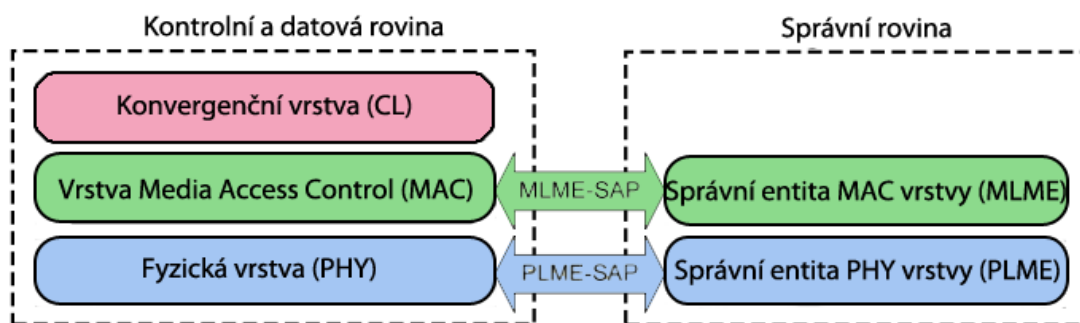
- **MAC vrstva:** Na této úrovni je kódování prováděno na základě CCM algoritmu, kterým je zabezpečen každý rámec mezi uzly. CCM zajišťuje integritu a důvěryhodnost dat. Rámce jsou kódovány a dekódovány na každém uzlu kromě speciálních řídicích rámců v první fázi bootstrapping procesu. CCM poskytuje také ochranu před anti-replay a DoS útoky.
- **EAP-PSK:** Zajištění integrity a důvěryhodnosti dat na zabezpečeném kanálu, kde výměna zpráv mezi servery a uzly probíhá pod EAP mechanismem.

Distribuce skupinového klíče

Každý uzel má hlavní klíč GMK (*Group Master Key*). Tento klíč je poslán individuálně každému uzlu pomocí EAP-PSK zabezpečeného kanálu. Klíč GMK je generován pomocí EAP serveru. Distribuce klíče se provádí ve dvou případech: v prvním případě při bootstrapping procesu a ve druhém případě při změně klíčů. Životnost GMK je dlouhá, ale je vhodné čas od času provádět změnu klíče, které se provádí pomocí vyšších vrstev. Doporučená doba trvanlivosti jednoho GMK je 90 dní nebo po poslání 1000000 rámců.

7. PRIME

Standard PRIME (*Powerline Intelligent Metering Evolution*) byl vyvinut španělskou firmou Iberdrola a v roce 2012 byl schválen mezinárodním standardem ITU-T G.9904. Standard je zaměřen na poskytování spolehlivé a robustní komunikace v aplikacích, jako je AMM (*Advanced Meter Management*). Rychlost této technologie se pohybuje v řádech desítek kilobitů za sekundu. Doporučení se zabývá prvními dvěma vrstvami OSI modelu a jeho příslušnými management rovinami.



Obr. 34: Referenční model vrstev ITU-T G.9904 [8]

Spojová vrstva je rozdělena na dvě části. Konvergenční podvrstva klasifikuje provoz a spojuje ho s příslušným spojením na MAC vrstvě. Vrstva mapuje jakýkoliv provoz tak, aby na MAC vrstvě byl zapouzdřen do MSDU (*MAC Service Data Unit*). Dále tato vrstva může provádět kompresi dat. Je specifikováno několik SSCS (*Service Specific Convergence Sublayers*) podvrstev pro podporu různých toků dat. MAC podvrstva standardně poskytuje služby spojené s přístupem na sdílené medium, alokace pásma, vytvoření a udržování spojení a také se na této vrstvě řeší topologie. Fyzická vrstva vysílá a přijímá MPDU mezi sousedními uzly pomocí OFDM modulace.

7.1. Fyzická vrstva

Na fyzické vrstvě pro jednotlivé subnosné OFDM, jsou použity následující modulace⁵.

- DBPSK (42,9 kbit/s)
- DQPSK (85,7 kbit/s)
- D8PSK (128,6 kbit/s)

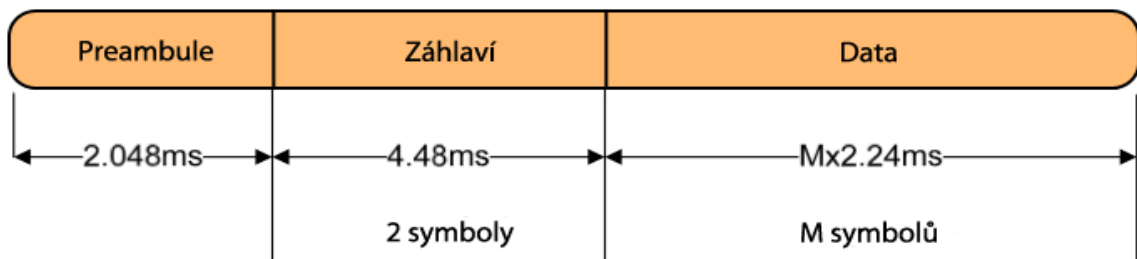
Blokové schéma modulů fyzické vrstvy je na obr. 35. Po přijetí MPDU fyzickou vrstvou je vygenerován rámec fyzické vrstvy. Poté jsou data poslána do bloku CRC, který se stará o kontrolu dat. Poté následuje konvoluční kódér s poměrem $\frac{1}{2}$. Ten musí být použit společně s prokladačem. Nicméně je možné tento blok přeskočit v případě, že na kanálu je nízká chybovost, nebo pokud je nutné zvýšit propustnost. Pro omezení dlouhých posloupností identických bitů je zde implementován scrambler, jenž se používá pokaždé. Funkce a struktura scrambleru i prokladače jsou stejné jako u G3-PLC doporučení. Poté jsou data modulována jednou z modulací (DBPSK, DQPSK, D8PSK) a je na ně aplikována inverzní Fourierova transformace IFFT společně s cyklickou předponou, což tvoří OFDM modulaci.

⁵ V závorce jsou uvedeny teoretické rychlosti modulací při nekódované komunikaci.



Obr. 35: Blokové schéma funkčních bloků fyzické vrstvy [8]

Struktura rámce fyzické vrstvy je zobrazena na obr. 36. Každý rámec začíná preambulí, která trvá 2,048 ms. Poté následují OFDM symboly, z nichž každý trvá 2,24 ms. První dva OFDM symboly nesou záhlaví fyzické vrstvy. Zbytek symbolů nese data z vyšších vrstev. Počet datových symbolů je signalizován v PHY záhlaví a může být maximálně 63 symbolů dlouhý.



Obr. 36: Struktura rámce fyzické vrstvy [8]

7.1.1. Parametry fyzické vrstvy

Parametr	DBPSK		DQPSK		D8PSK	
	On	Off	On	Off	On	Off
Konvoluční poměr $\frac{1}{2}$	On	Off	On	Off	On	Off
Informační bity na sub-nosnou, N_{BPSK}	0,5	1	1	2	1,5	3
Informační bity na OFDM symbol, N_{BPS}	48	96	96	192	144	288
Teoretická rychlost	21,4	42,9	42,9	85,7	64,3	128,6
Maximální délka MSDU v bitech	3016	6048	6040	12096	9064	18144
Maximální délka MSDU v bajtech	377	756	755	1512	1133	2268

Tab. 9: Parametry fyzické vrstvy [8]

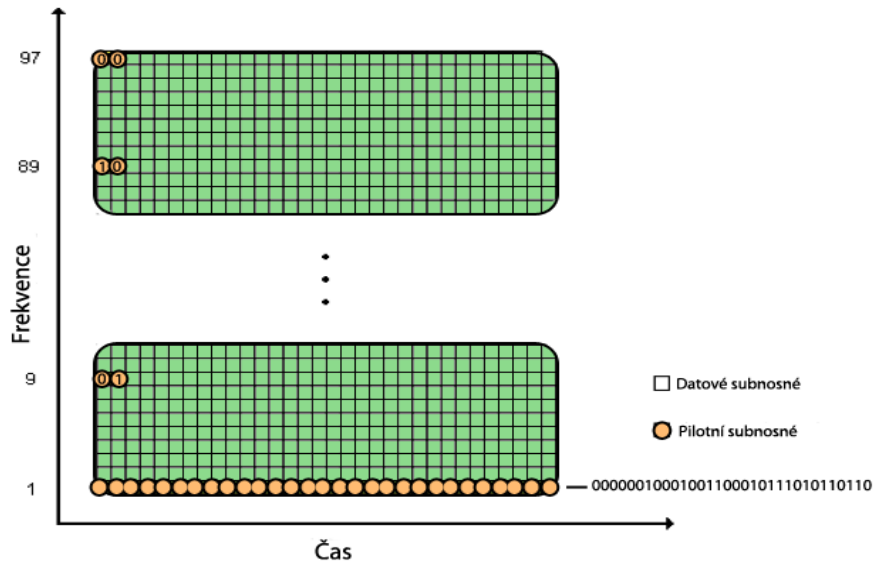
Pro generování OFDM signálu musí být pro všechny kmitočty využita stejná referenční frekvence. Preamble je použita na začátku každého PPDU pro synchronizační účely. Pro dosažení maximálního výkonu je místo OFDM symbolů v preambuli použit lineární chirp signál s konstantní obálkou definovaný takto:

$$S_{CH}(t) = A \times \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \times \cos\left[2\pi\left(f_0 t + \frac{1}{2}\mu t^2\right)\right]$$

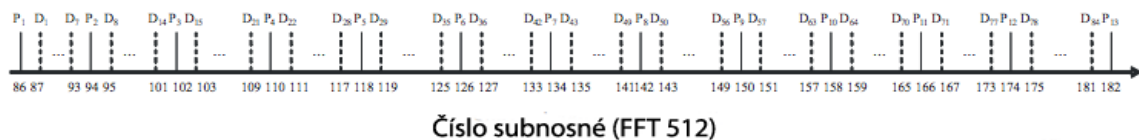
(6)

7.1.2. Pilotní nosné

Záhlaví fyzické vrstvy se skládá ze dvou symbolů OFDM, které obsahují 13 pilotních subnosných, které jsou použity pro odhad chyby začátku vzorkování a k frekvenčnímu vzorkovacímu posunutí. Jedna z pilotních nosných je použita pro fázovou referenci. Alokace pilotních a datových frekvencí je zobrazena na následujícím obr. 37.

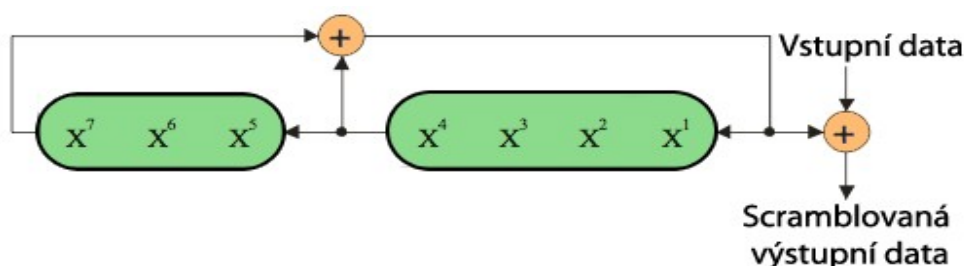


Obr. 37: Alokace datových a pilotních subnosných [8]



Obr. 38: Alokace frekvencí pilotních a datových subnosných vně záhlaví [8]

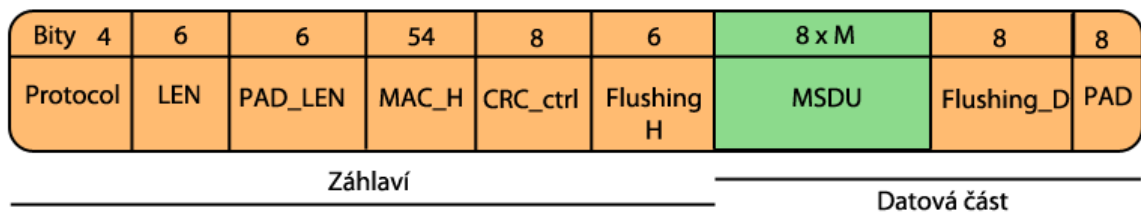
Pilotní nosné jsou modulované BPSK s pseudonáhodnou posloupností symbolů, aby nedocházelo ke generování spektrálních čar. Fáze pilotních nosných je určována pseudonáhodnou posloupností, které je cyklickým rozšířením 127-bitové sekvence uvedené v [8]. V této sekvenci je posunutí fáze o 180° symbolizováno log. 1 a fáze 0° log. 0. Jeden bit z příslušné sekvence je použit na jednu pilotní nosnou, počínaje první nosnou v prvním OFDM symbolu. Pseudonáhodná posloupnost je generována scramblerem. Schéma scrambleru je zobrazeno na obr. 39.



Obr. 39: Blokové schéma scrambleru [8]

7.1.3. Záhlaví fyzické vrstvy

Je tvořené dvěma OFDM symboly, které jsou vždy modulovány pomocí DBPSK modulace a je použit konvoluční kodér (FEC). Datové symboly však mohou být modulovány jiným typem modulace, což závisí na nastavení MAC vrstvy. MAC vrstva vybírá modulační schéma dynamicky na základě předchozího vysílání s ohledem na chybovost nebo SNR. MAC vrstva také rozhoduje, zda bude použito FEC (konvoluční kodér) kódování nebo ne. Záhlaví je složeno z 84 datových nosných a 13 pilotních nosných frekvencí. V datové části se potom každý OFDM symbol skládá z 96 datových a jedné pilotní nosné frekvence. Každá datová nosná přenáší skupinu 1, 2 nebo 3 bitů.



Obr. 40: Struktura záhlaví fyzické vrstvy [8]

Pole PHY záhlaví:

- **PROTOCOL:** 4 bitové pole, kde jednotlivé hodnoty signalizují použité modulační schéma.
 - 0: DBPSK
 - 1: DQPSK
 - 2: D8PSK
 - 3: Rezervováno
 - 4: DBPSK + FEC
 - 5: DQPSK + FEC
 - 6: D8PSK + FEC
 - 7-15: Rezervováno
- **LEN:** Definiuje délku datové části po kódování v OFDM symbolech
- **PAD_LEN:** Definiuje délku PAD pole před kódováním.
- **MAC_H:** Obsahuje 54 bitů záhlaví MAC vrstvy pro větší odolnost vůči chybám. Záhlaví MAC je generováno spojovou vrstvou.
- **CRC:** Kontrolní CRC hodnota počítaná ze záhlaví PHY.
- **FLUSHING_H:** 6 bitů nastaveny do log. 0 pro restartování konvolučního dekodéru.

Fyzickou vrstvou jsou v datové části přidána další dvě pole na konci rámce. Jedná se o pole FLUSHING_D, jehož funkce je opět restartování konvolučního dekodéru a v rámci je přítomné pouze pokud je zapnutá funkce FEC. Pole je dlouhé 8 bitů. Druhým polem je PAD, které slouží k vyplnění rámce. Vyplňující bity jsou log. 0.

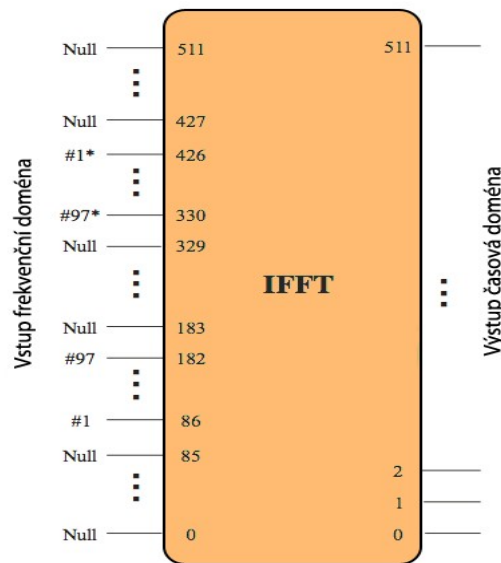
7.1.4. Konvoluční kodér

Nekódovaný tok dat lze zakódovat konvolučním kóděrem. Kódový poměr je $\frac{1}{2}$ s omezením délky $K=7$. Kódový generátor polynomu „x“ a „y“ nabývají stejné hodnoty jako v případě G3-PLC. Na počátku je stav kodéru nastaven na log. 0. Na konci záhlaví a poté na

konci rámce se využívá pole FLUSHING pro uvedení konvolučního kodéru do počátečního stavu. Konvoluční kodér má stejnou strukturu, jako u G3-PLC.

7.1.5. Modulace

Datová část PPDU je modulována pomocí diferenčního fázového klíčování s jednou pilotní nosnou a 96 datovými nosnými, které se skládají z 96, 192 nebo 288 bitů na symbol, jak již bylo uvedeno v tab. 9. Bitový tok z prokladače je rozdělen na dvě skupiny o N bitech, z nichž první bit je ze skupiny nejvýznamnější (MSB). Pro OFDM modulaci se využívá 512-bodová IFFT se vzorkovacím kmitočtem 250 kHz, kde jednotlivé nosné frekvence jsou mapovány dle následujícího obr. 41. Poté je vytvořena cyklická předpona ze 48 vzorků.



Obr. 41: Mapování nosných frekvencí [8]

7.1.6. Cyklická předpona

Předpona je tvořena zopakováním posledního úseku aktuálního symbolu a vložena na začátek. Celková doba trvání přepony je dána vztahem:

$$T_{tot} = T + T_{cp} \quad (7)$$

Kde T je doba trvání užitečného signálu a T_{cp} je doba trvání předpony. Čím delší je T_{cp} , tím je přenos odolnější proti chybám, ale na druhou stranu se přenesou méně dat.

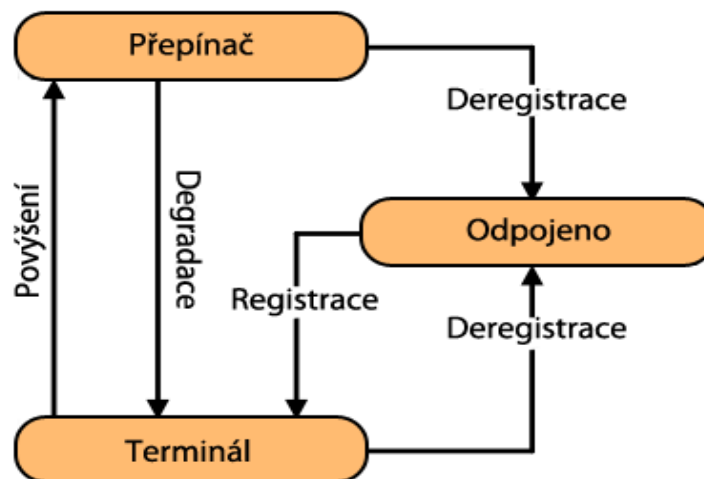
7.2. Spojová vrstva

Síť se skládá ze dvou typů zařízení, jejichž propojení lze chápat jako stromovou strukturu. Prvním typem zařízení je základní uzel (*Base Node*). Tento uzel je hlavní stanicí a zároveň kořenem stromové struktury. Spravuje ostatní podřízené stanice a v síti existuje pouze jeden základní uzel. Před připojením ostatních stanic tvoří síť a stanice, které „se chtějí“ do této sítě připojit, musí splnit požadavky pro připojení.

Druhým typem zařízení je servisní uzel. Všechny ostatní stanice v síti zastávají tuto roli. Pro připojení do sítě musejí vykonat proces registrace se základním uzlem. Tyto uzly mají dvě základní funkce; první funkcí je udržovat spojení v síti a druhou přepínat data od ostatních stanic.

Základní uzel nemění svou roli, dokud není přenastaven. Servisní uzly však mohou zastávat dvě role a dynamicky je měnit v závislosti na stavu sítě. Těmito rolemi jsou:

- **Odpojen (*Disconnected*):** Počáteční stav zařízení pro každý servisní uzel. Je zřejmé, že v tomto stavu stanice nemůže komunikovat a není účastníkem v síti. Hlavním úkolem v tomto stavu je vyhledat síť a pokusit se o registraci do této sítě.
- **Terminál:** V tomto stavu je stanice schopná komunikovat, je účastníkem v síti a také je sdružena se základním uzlem. Uzel však není schopen přepínat data od ostatních zařízení.
- **Přepínač (*Switch*):** Uzel je schopen vykonávat veškeré funkce terminálu a je schopen přeposílat data od ostatních stanic ve stejné síti.

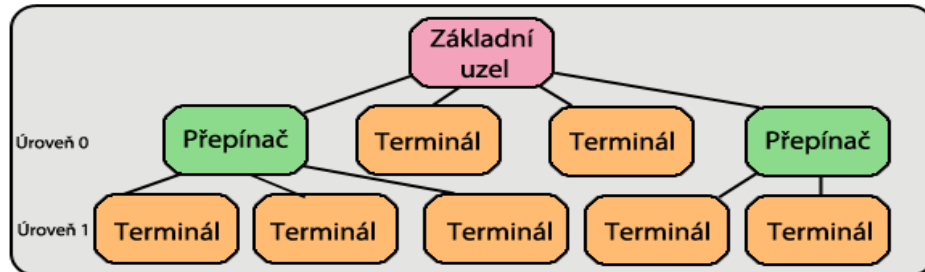


Obr. 42: Jednotlivé stavy servisního uzlu [8]

Události, které spouštějí změnu stavu servisní stanice, jsou znázorněny na obr. 42.

- **Registrace:** Proces, při kterém se servisní uzel přihlašuje k základnímu. Základní uzel přidá stanici do svého listu registrovaných uzlů. Základní uzel může registraci přijmout nebo zamítnout.
- **Odhlášení:** Servisní uzel sám sebe vyjme z listu registrovaných zařízení na základním uzlu. Impuls k této akci může být dán servisním uzlem samotným nebo základním uzlem. Servisní stanice se odhlašuje od základní z důvodu, že našla lepší bod pro spojení, jako je nový přepínací uzel, přes který daná stanice bude připojena dále do sítě. Základní uzel odhlašuje stanici v případě selhání některé z MAC procedur při spojení.
- **Povýšení (Promotion):** Proces, při kterém je uzel povýšen do stavu přepínače (*Switch*). Přejít do stavu přepínače není možné rovnou ze stavu odpojen (*Disconnected*).

- **Degradace (Demotion):** Degradace přepínače na terminál. Přejchod je vyvolán například skutečností, že přepínač již neposkytuje služby nižším terminálům.



Obr. 43: Hierarchie sítě PRIME [8]

Na obr. 43 je znázorněna hierarchie sítě. Síť se dělí na úrovně (Level 0, Level 1 atd.) a může obsahovat až šest úrovní. Kořen stromové struktury je tvořen základním uzlem, ke kterému jsou připojeny stanice úrovně 0. V poslední úrovni 6 jsou již jen stanice ve funkci terminálu.

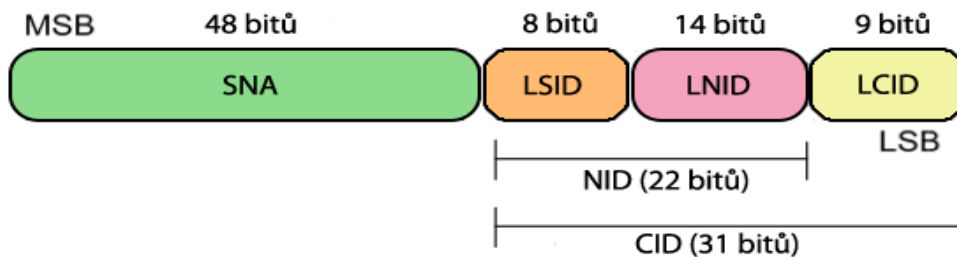
7.2.1. Adresace

Adresa spojové vrstvy u každého uzlu se skládá z 48-bitové univerzální MAC adresy, která je definována v doporučení IEEE 802-2001. Adresa se nazývá EUI-48, je přiřazena při výrobě zařízení a jednoznačně identifikuje uzel v síti. EUI-48 adresa základního uzlu je jednoznačným identifikátorem sítě a nazývá se SNA (*Subnetwork Address*).

Při procesu registrace je servisnímu uzlu přiřazen 14-bitový identifikátor LNID (*Local Node Identifier*). Identifikátor jednoznačně určuje servisní uzel v rámci uzlů, které jsou připojeny ke stejnému přepínači. LNID společně s 8-bitovým identifikátorem SID (*Switch Identifier*) tvoří 22-bitový NID (*Node Identifier*), jenž je tak unikátní v rámci dané sítě. SID adresa je získána od přepínače, ke kterému je stanice ve stavu terminálu připojena (přepínač vyšší úrovně). Pro stanice v roli přepínače se tento identifikátor nazývá LSID (*Local Switch Identifier*) a je přiřazen uzlu v rámci promotion procesu základní stanicí. Každé zařízení je tedy jednoznačně určeno pomocí SNA, LSID a LNID.

Při vytvoření spojení je generována další adresa LCID (*Local Connection Identifier*), která je 9 bitů dlouhá a určuje spojení s uzlem. Spojení NID a LCID tvoří 31-bitový identifikátor spojení CID (*Connection Identifier*), který určuje dané spojení v síti. Každé spojení lze identifikovat na základě SNA a CID. Přiřazování LCID je založeno na následujících pravidlech:

- **LCID=0x000 až 0x0FF:** Pro spojení vyžádaná základním uzlem, kde alokace je provedena tímto uzlem.
- **LCID=0x100 až 0x1FF:** Pro spojení vyžádaná servisním uzlem, kde alokace je provedena servisním uzlem.



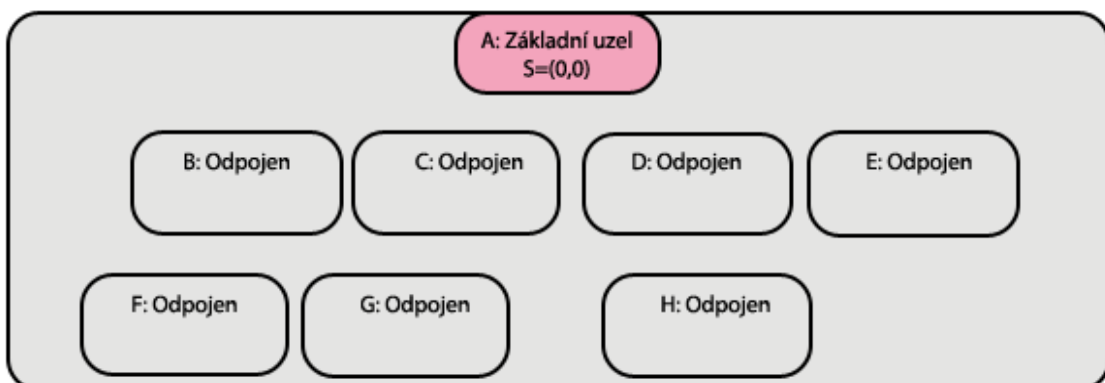
Obr. 44: Struktura adresy [8]

Speciální identifikátory:

- **LSID= 0x00:** Identifikátor základního uzlu.
- **LSID=0xFF:** Rezervováno pro signalizaci chyby v určitých specifických polích zpráv. Nesmí být použito nikde jinde.
- **NID=0x3FFF:** Adresa určena pro broadcast a multicast vysílání. V některých speciálních polích může být použit také pro signalizaci chyby.

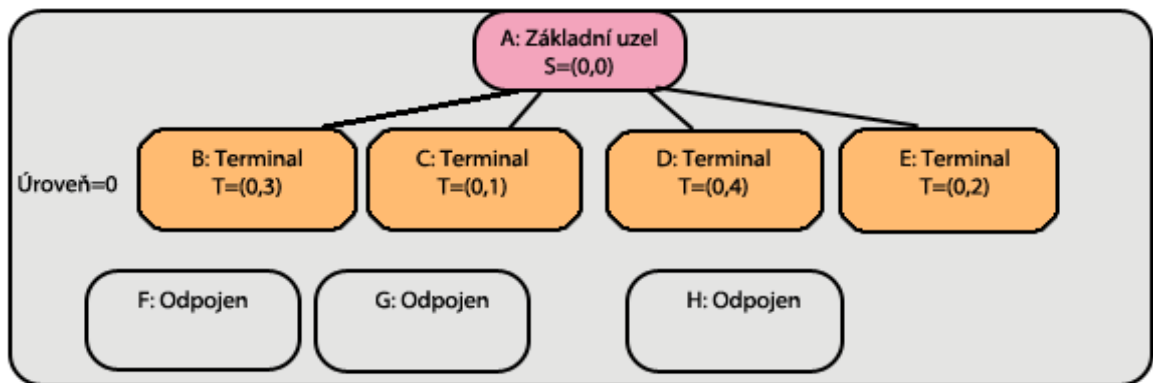
7.2.2. Příklad přiřazení adresy

Před připojením jakékoliv stanice je základní uzel, který má adresu. Na obrázku je adresa vyznačena takto: NID=(SID, LNID); písmeno S(Switch)/T(Terminál) značí, v jakém režimu se uzel aktuálně nachází.



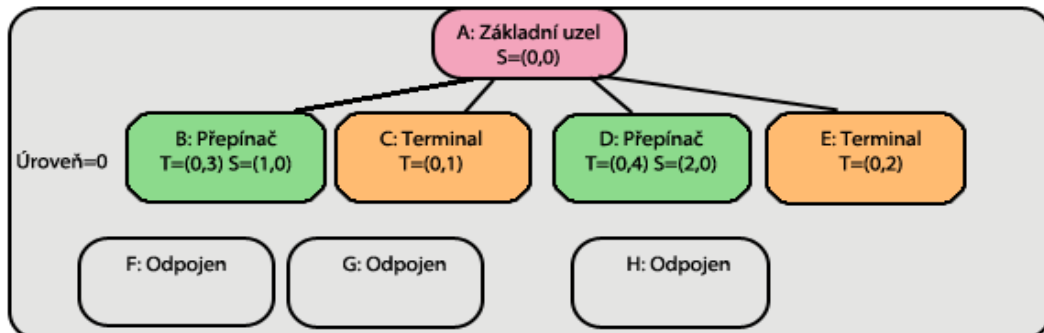
Obr. 45: Příklad přiřazení adresy: fáze 1 [8]

Jednotlivé uzly B až H se pokusí o registraci na uzlu A, který má adresu S(0,0). Pouze uzly B,C,D, a E jsou schopné registrace do sítě a obdrží NID. Tyto uzly jsou registrovány na základním uzlu, který plní funkci přepínače S. Z tohoto důvodu obdrželi SID základního uzlu a unikátní LNID adresu. Protože tyto stanice jsou připojené přímo k základnímu uzlu, jsou na úrovni 0 a ve stavu terminál.



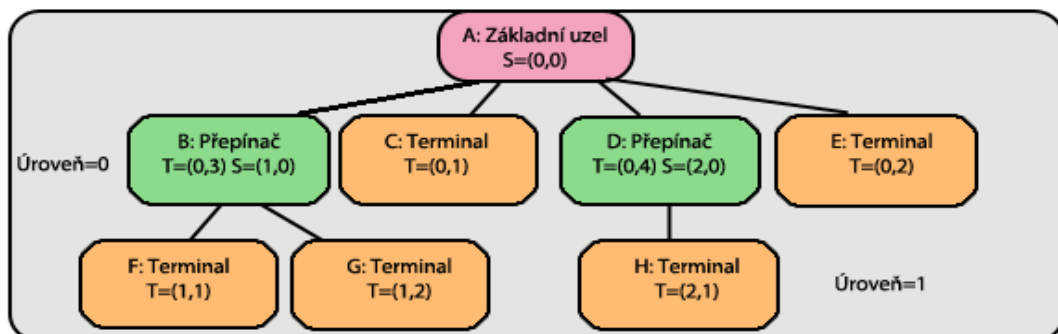
Obr. 46: Příklad přiřazení adresy: fáze 2 [8]

Stanice F, G a H nejsou schopny se připojit k základní stanici, která je momentálně jediným přepínačem v síti, proto stanice vyšlou PNPDU (*Promotion Needed PDU*) zprávu pomocí broadcastu. Tyto zprávy obdrží uzel B a D, což vyústí ve vyslání požadavku na základní uzel o povýšení do stavu přepínače. Při tomto procesu obdrží unikátní LSID. Pro vlastní komunikaci budou přepínače stále využívat svoje vlastní NID, které bylo přiřazeno při registraci, ale pro funkce přepínání dat od stanic připojené na ně budou využívat nové LSID společně s vlastním LNID. Nový identifikátor LNID přepínače je stejný jako u základní stanice.



Obr. 47: Příklad přiřazení adresy: fáze 3 [8]

Po dokončení promotion stavu jsou stanice F, G a H schopné začít svůj registrační proces. Získají od nadřazené stanice úroveň 0 SID identifikátor a unikátní LNID. Tyto stanice se po dokončení registračního procesu nacházejí na úrovni 1.



Obr. 48: Příklad přiřazení adresy: fáze 4 [8]

Pro broadcast a multicast jsou vyhrazeny následující adresy:

Typ	LNID	Popis
Broadcast	0x3FFF	Paket bude doručen na všechna zařízení v síti
Multicast	0x3FFE	Adresa pro zařízení v multicast skupině
Unicast	celý rozsah krom adresy pro BC a MC	Adresa jednoho uzlu

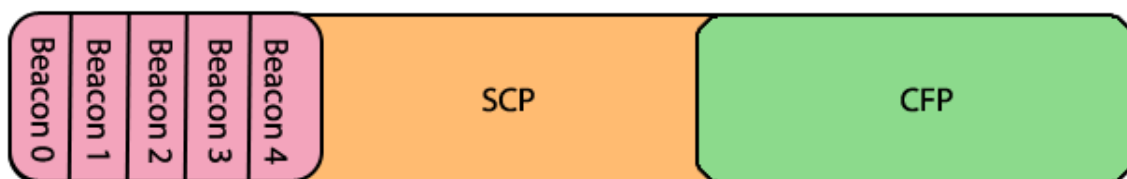
Tab. 10: Adresy zařízení [8]

Servisní uzel je v počátečním stavu odpojen. Může pouze přijímat beacon zprávy a posílat PNPDU zprávy pro povýšení do stavu terminál. Každý uzel si udržuje svojí přepínací tabulku, která je vždy aktualizována s přijmutím beacon zprávy od nového přepínacího uzlu v síti. Servisní uzel si může ve své tabulce vybrat jakýkoliv přepínač a poslat mu žádost o registraci. Skutečnost, na jaký přepínač se uzel bude připojovat, lze ovlivnit lokální politikou v síti. Servisní uzel po nějakou dobu naslouchá kanálu, a pokud není přijatá žádná beacon zpráva, uzel vyšle broadcastem PNPDU. Tento rámec je vyslán pomocí nejrobustnější modulace, aby bylo zajištěno největší pokrytí. Aby nedocházelo k zahlcení sítě vlivem broadcastu těchto rámců v situaci kdy se snaží připojit do sítě větší množství uzlů najednou, je zařízení povinné omezit počet vyslaných rámců v závislosti na přijatých PNPDU rámcích od jiných stanic. Registrační proces se zahajuje pomocí vyslání REG control paketu na základní stanici.

Základní uzel, popřípadě přepínač, je zodpovědný za vysílání beacon zpráv v pevném časovém intervalu. Přepínače mají frekvenci vysílání beacon zpráv danou základním uzlem. Dále má základní uzel na starost povyšovat stanice, nebo je degradovat do nižšího stavu. Dalším úkolem základní stanice je přiřazování kanálu jednotlivým stanicím. Ostatními úkoly jsou rozesílání náhodné sekvence pro bezpečnostní mechanismus a správa multicast skupin.

7.2.3. Přístup na kanál

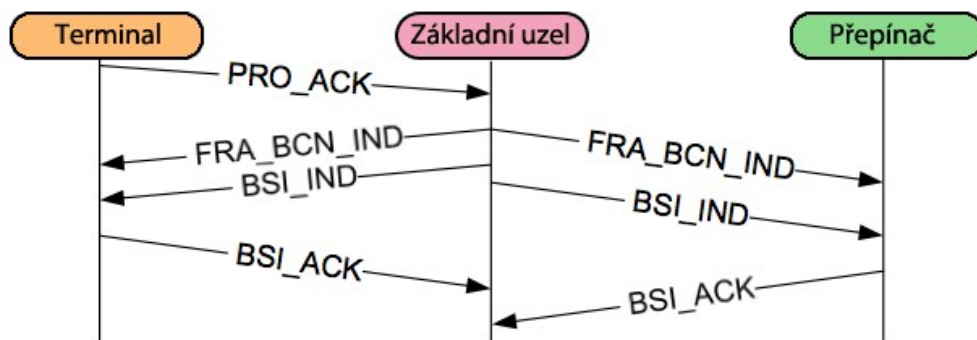
Čas je rozdělen do intervalů, jejichž souhrn se nazývá MAC rámec. Uzly v síti mohou přistupovat k mediu ve sdíleném intervalu SCP (*Shared Connection Period*), nebo mohou požádat o vyhrazený interval CFP (*Connection Free Period*). V časovém úseku vyhrazeném pro CFP je nutné požádat o alokaci základní stanici. Základní uzel poté může přijmout požadavek a alokovat určitý čas v tomto intervalu, nebo ho zamítnout. V intervalu SCP může stanice vysílat za využití CSMA/CA a musí respektovat hranice tohoto intervalu. Rozměry MAC rámce (rozložení intervalů pro vysílání) je oznamováno v beacon zprávách. Jeden rámec obsahuje jeden nebo více úseků pro beacon, jeden interval SCP a jeden nebo žádný interval CFP.



Obr. 49: Struktura časového MAC rámce [8]

7.2.4. Interval pro Beacon zprávy

Beacon zprávy jsou vysílány s nejrobustnějším typem modulace, s FEC kódováním a s maximálním možným výkonem implementovaným v zařízení. První beacon časový slot je rezervován pro základní uzel. Ostatní sloty pro beacon zprávy se mohou v časovém rámci vyskytovat s různou četností v závislosti na počtu přepínačů. Počet beacon slotu indikuje BPDU (*Beacon PDU*) zpráva základního uzlu. Sloty pro beacon zprávy přepínačů jsou alokovány při procesu promotion a jakmile je v síti přepínač, základní uzel musí alokovat časový interval pro jeho beacon zprávy. S každým novým přepínačem v síti může základní uzel změnit frekvenci vysílání nebo změnit slot pro jednotlivé beacon zprávy. V případě těchto změn jsou stanice informovány pomocí BSI (*Beacon Slot Information*) kontrolního paketu pro každý přepínač, kterého se to týká individuálně. Po přijetí BSI přepínač odpovídá ACK rámcem. V případě změny počtu beacon slotů je základním uzlem vyslán FRA (*FRAME*) paket do celé sítě pomocí broadcastu. Přepínače tento paket přeposílají na svá podřízená zařízení. FRA paket je nutný z toho důvodu, aby každé zařízení vědělo, že nastala změna v časovém rámci.



Obr. 50: Příklad sekvence kontrolních paketů při povýšení [8]

7.2.5. Alokace beacon slotu

V době, kdy dochází ke změně počtu beacon slotů je nutné zajistit, aby všechny uzly změnilly své nastavení ve stejnou dobu. V opačném případě by mohlo dojít ke kolizi. Pro vyřešení tohoto problému je u PRIME zaveden beacon super-rámec. Ten je tvořen 32 beacon rámci. Každá zpráva beacon obsahuje 5-bitové sekvenční číslo. Každá zpráva, která poté vyžaduje změnu v časovém rámci, sebou nese i sekvenční číslo, při němž by ke změně mělo dojít. Požadovaná změna u všech zařízení nastane pouze v případě, kdy se sekvenční číslo oznámené ve zprávě shoduje s aktuálním sekvenčním číslem beacon. Sekvenční čísla se po 32 beacon zprávách nulují.

7.2.6. SCP interval

V tomto časovém rozpětí může jakákoliv stanice vysílat data. Kolizím je předcházeno pomocí mechanismu CSMA/CA. Na počátku CSMA/CA přístupu, zařízení čeká náhodný back-off interval, který je založen na prioritě dat připravených pro vysílání. Nižší hodnoty priority jsou upřednostňovány. Před tím, než zařízení spustí svůj back-off odpočet, musí se ujistit, zda je SCP perioda dostatečně dlouhá pro vykonání back-off a následné vysílání dat. Délka tohoto intervalu může být rozdílná a je indikována v beacon zprávách. Maximální doba intervalu je délka časového rámce, kromě času vyhrazeného pro beacon zprávy. Jinými slovy, rámec neobsahuje CFP interval. Přepínače mohou své beacon zprávy vysílat s menší

frekvencí, což znamená, že podřízené uzly pod přepínačem mohou vysílat i v době, kdy přepínač naslouchá beacon zprávám od základního uzlu. Kontrolní pakety MAC by měly být vysílány v SCP intervalu s prioritou jedna.

7.2.7. CFP interval

Posledním segmentem časového MAC rámce je CFP interval. Časový rámce tento interval může obsahovat nebo nemusí. V této časové oblasti je stanicím přiřazován kanál v závislosti na jejich požadavku. Pokud žádný uzel nepotřebuje v tomto intervalu vysílat, je CFP vynechán. Požadavky terminálů nebo přepínacích uzlů na alokaci kanálu jsou směřovány na základní uzel. Přepínací stanice pouze vykonávají rozhodnutí základního uzlu. Alokace stejného CFP může být stejná pro různé stanice, nicméně je nutné, aby zařízení byla z hlediska časového rámce oddělená. Alokace kanálu se provádí pomocí CFP MAC kontrolního rámce, na který základní uzel odpovídá potvrzením nebo zamítnutím. Jestliže je požadavek schválen, základní uzel pošle informace, v jakém okamžiku CFP servisní uzel může vysílat, délku vysílacího času a počet časových rámců, po který dané přiřazení CFP platí. V případě reorganizace struktury časového rámce, například vlivem přidání beacon slotu, je alokace CFP zrušena. Základní uzel může také poslat zrušení přiřazení pomocí CFP MAC kontrolního rámce. Dále základní uzel rozesílá broadcastem informaci o přiřazení CFP intervalu všem stanicím pomocí FRA MAC kontrolního rámce. V případě více-úrovňové struktury sítě základní uzel alokuje CFP pro každý připojený přepínač.

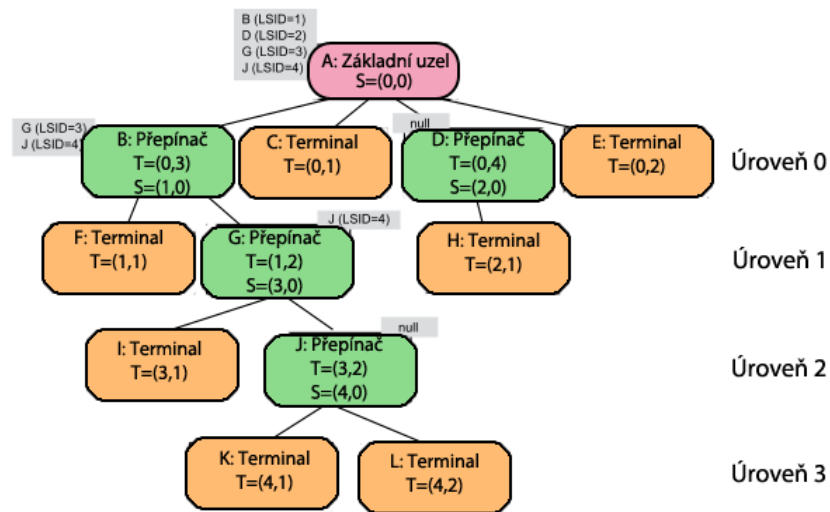
7.2.8. Sledování přepínačů

Servisní uzly neustále sledují všechny přepínače v jejich dosahu pomocí databáze přijatých beacon zpráv. Díky tomu jsou servisní stanice informovány o kvalitě přijímaného signálu a v případě potřeby (zhoršení kvality spoje pod únosnou mez) jsou schopné se přepojit na jiný přepínač. Z pohledu přepínačů je tento proces složitý, protože podřízená zařízení jsou přes něj připojena k základnímu uzlu.

V případě odpojených zařízení, která se chtějí připojit do sítě, je problém kvůli neznalosti struktury časového rámce. Jak již bylo řečeno, nové zařízení posílá PNPDU zprávu, která však nemusí přijít pouze v SCP intervalu. Z tohoto důvodu terminály musí zpracovat všechna PNPDU během SCP, ale také CFP a beacon intervalů. Při zpracování PNPDU se terminál může rozhodnout tuto zprávu ignorovat, nicméně pokud stejné zařízení pošle určité množství PNPDU, indikuje to, že v jeho okolí není žádná jiná stanice, ke které by se mohl připojit. V tomto případě musí terminál vyžádat povýšení do stavu přepínače.

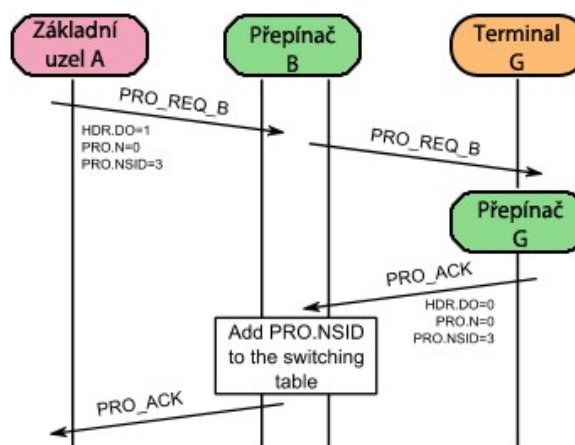
7.2.9. Přepínání

Každý přepínač v síti si spravuje tabulku ostatních přepínacích uzlů, které jsou přes něj připojené do sítě. Udržování této tabulky je dostačující z důvodu, že každý terminál s sebou nese identifikaci (PKT.SID) svého přepínače, na který je připojen. Tato cesta vede k usnadnění komunikace, protože přepínače nemusejí naslouchat všem terminálům přes ně připojené. Počáteční stav přepínací tabulky neobsahuje žádný záznam. Tabulka je dynamicky aktualizována pomocí sledování promotion a demotion paketů. Nový záznam v tabulce je vytvořen pro každý promotion potvrzení (PRO_ACK), které obsahuje shodné PKT.SID s SID přepínacího uzlu samotného nebo s jakýmkoliv existujícím záznamem v tabulce.



Obr. 51: Příklad záznamů v přepínací tabulce [8]

Na obr. 51 je ukázka sítě, kde jsou znázorněny přepínací tabulky u jednotlivých zařízení. Je zde znázorněna situace, kdy servisní uzel G požádá o povýšení do stavu přepínače. Základní uzel mu přidělí NSID=3. Uzel G poté odesílá potvrzení, které je přijato uzlem B. Ten nahédne do tohoto potvrzení a zjistí, že se jedná o povýšený uzel v jeho hierarchii, a vloží si nový záznam do tabulky.



Obr. 52: Přidávání záznamů přepínací tabulky [8]

Odstranění záznamu z přepínací tabulky se provádí po přijetí demotion potvrzení. Odpovídající záznam v tabulce je označen jako „To Be Removed“ a spustí se časovač. Tento mechanismus zajišťuje, aby všechny pakety, které stále používají dané LSID, opustily síť. Po vypršení časovače je záznam z tabulky odstraněn.

Přepínání dat je založeno na selekci. Data přijatá přepínačem musí splnit určité podmínky, aby mohla být přeposlána dále. Pokud se tak nestane, data jsou odstraněna. Podmínky pro přeposílání paketu v downlink směru jsou následující:

- Cílový uzel musí být připojen do podsítě přes daný přepínač. To znamená, že PKT.SID je rovno SID přepínače, nebo existuje záznam v přepínací tabulce.

- Cílová adresa je typu broadcast (PKT.LNID=0x3FFF).
- Cílová adresa je typu multicast (PKT.LNID=0x3FFE) a nejméně jeden servisní uzel je členem této multicast skupiny.

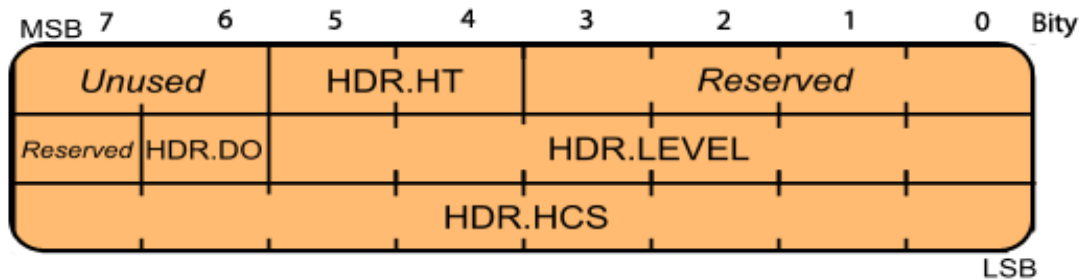
Ve směru uplink platí následující podmínky:

- Zdrojový uzel dat je připojen do sítě pomocí daného přepínače. PKT.SID je totožné s přepínačem nebo existuje záznam v tabulce.
- Paket je typu broadcast nebo multicast a vysílající uzel je registrován na daném přepínači.

Rozlišení směrů se provádí pomocí pole HDR.DO, kde hodnota 1 signalizuje downlink a hodnota 0 uplink. U broadcast paketů se využívá nejrobustnější modulace a FEC kódování. Přepínače si udržují multicast tabulku, která obsahuje LCID multicast skupiny, v níž jsou uzly připojené na daný přepínač. Data jsou přeposlána, pouze pokud existuje shoda LCID v tabulce. Záznam do tabulky je přidán s příchodem MUL kontrolního paketu, který prochází přes přepínač. Mezi uzly probíhá posílání zpráv Keep-Alive.

7.2.10. Typy MAC PDU

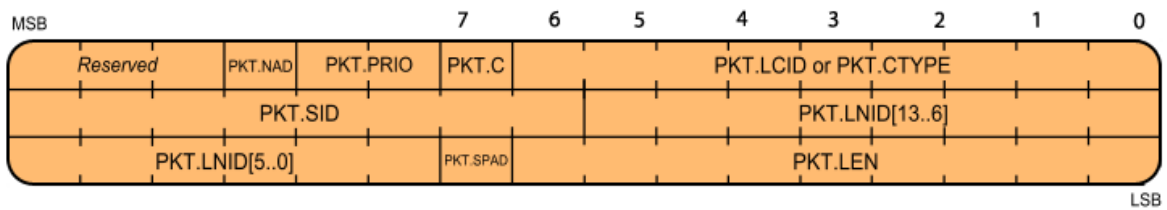
Většina dat posílaných v PRIME síti jsou zapouzdřena v základním MAC rámcí. Rámec se skládá ze záhlaví a poté z jednoho nebo více paketů. Nakonec je přidáno 32-bitové CRC pole. Struktura záhlaví je zobrazena na obr. 53.



Obr. 53: Struktura obecného MAC záhlaví [8]

- **Unused (2b):** Nepoužité bity vždy nastavené do 0.
- **HDR.HT (2b):** Udává typ záhlaví, kde pro základní MAC rámec je hodnota rovna 0.
- **Reserved (5b):** Rezervováno ITU-T, vždy nastaveno v 0.
- **HDR.DO (1b):** Signalizace směru uplink (HDR.DO=0) /downlink (HDR.DO=1).
- **HDR.LEVEL (6b):** Úroveň PDU v hierarchii sítě. Pakety mezi základním uzlem a úrovní 0 mají tuto hodnotu 0 a s rostoucí úrovní roste i číslo. Pokud je HDR.DO=0, pole reprezentuje úroveň stanice, které vyslala tento paket. V opačném případě pole reprezentuje úroveň přijímací stanice.
- **HDR.HCS (8b):** Kontrolní posloupnost pro záhlaví.

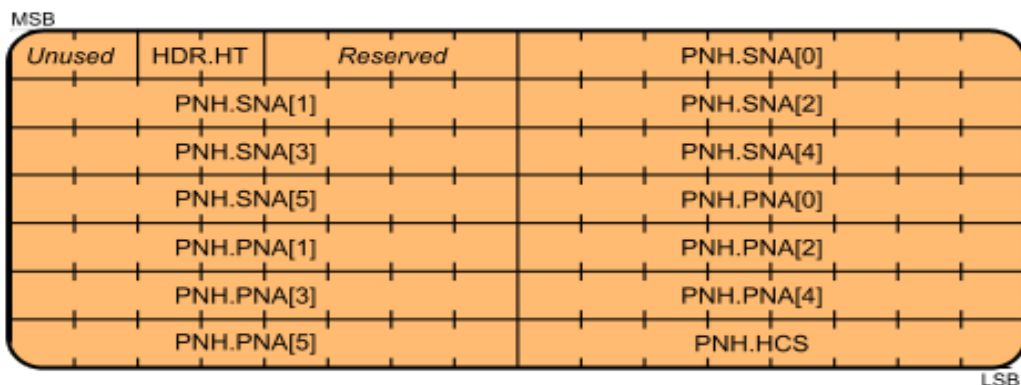
Struktura paketů, které následují za MAC záhlavím, se skládá z paketového záhlaví a dat. Záhlaví je 6 bajtů dlouhé s následující strukturou:



Obr. 54: Struktura záhlaví paketu [8]

- **Reserved (3b):** Rezervováno ITU-T a nastaveno vždy do 0.
- **PKT.NAD (1b):** Zda je použito zřetězení paketů. Pokud je nastaveno do 0, paket signalizuje zřetězení s ostatními pakety na cílové stanici.
- **PKT.PRIO (2b):** Signalizuje prioritu paketu 0-3.
- **PKT.C (1b):** Oznamuje zda se jedná o datový paket (PKT.C=0) či kontrolní (PKT.C=1).
- **PKT.LCID / PKTCTYPE (9b):** Identifikátor lokálního spojení nebo typu kontrolního paketu. Pokud je předchozí pole PKT.C=0, poté se jedná o identifikátor lokálního spojení datového paketu. V opačném případě (PKT.C=1) toto pole udává typ kontrolního paketu.
- **PKT.SID (8b):** Identifikátor přepínače. V závislosti na záhlaví MAC rámce HDR.DO se jedná o SID zdroje (HDR.DO=0) nebo cíle (HDR.DO=1).
- **PKT.LNID (14b):** Identifikátor uzlu, kde pole HDR.DO opět určuje, jestli se jedná o LNID zdroje nebo cíle.
- **PKT.SPAD (1b):** Pole informuje, zda byla data při použití šifrování vyplněna nulami, aby zformovala 128-bitový blok. Bit je relevantní pouze při použití bezpečnostního profilu 1.
- **PKT.LEN (9b):** Délka datové části paketu v bajtech.

Dalším typem rámce je Promotion PDU. Tento rámeček se používá, pokud zařízení nemá spojení s žádným přepínačem. Jedná se o broadcast do celé sítě, proto se tento rámeček vysílá s FEC a je modulován nejrobustnější modulací. Struktura PDU je zobrazena na obr. 55.

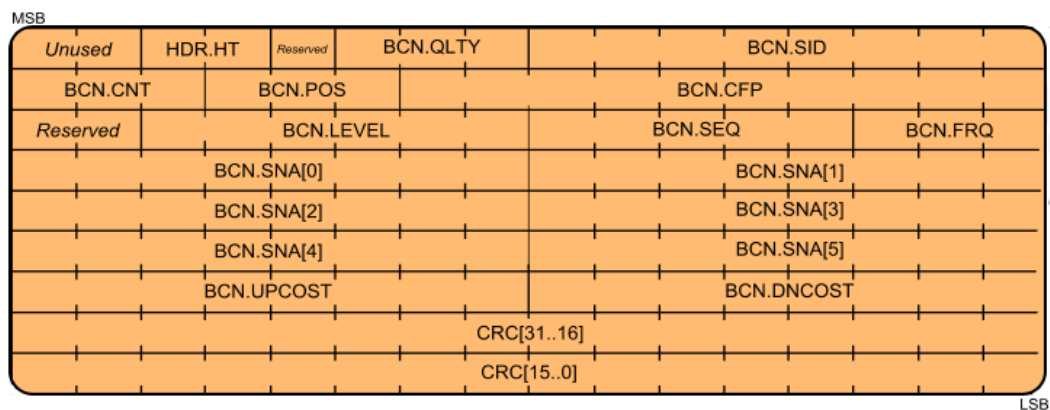


Obr. 55: Struktura promotion MAC PDU [8]

- **Unused (2b):** Vždy 0 pro oddělení PDU záhlaví a MAC záhlaví.

- **HDR.HT (2b):** Pole udává typ záhlaví, kde pro tento rámeček má hodnotu 1.
- **Reserved (4b):** Rezervováno ITU-T, nastaveno vždy do 0.
- **PNH.SNA (48b):** Jedná se EUI-48 adresu základního uzlu, ke kterému se servisní uzel snaží připojit.
- **PNH.PNA (48b):** EUI-48 adresa vysílacího uzlu, který požaduje povýšení.
- **PNH.HCS (8b):** Kontrolní sekvence záhlaví.

Posledním typem je Beacon PDU. Tato zpráva je rozesílána každým přepínačem včetně základního uzlu. Hlavním úkolem je propagace informací ohledně časového MAC rámce. BPDU je vysílán v pravidelných časových intervalech a slouží také k synchronizačním účelům. Struktura BPDU je na obr. 56.



Obr. 56: Struktura beacon PDU [8]

- **Unused (2b):** Stejný účel pole jako u předešlých typů záhlaví.
- **HDR.HT (2b):** Typ záhlaví, pro beacon je hodnota rovna 2.
- **Reserved (1b):** Stejný účel pole jako u předešlých typů záhlaví.
- **BCN.QLTY (3b):** Kvalita round-trip spojení od přepínače k základnímu uzlu. Hodnota 7 signalizuje nejlepší podmínky.
- **BCN.SID (8b):** Identifikátor přepínače, od kterého pochází zpráva.
- **BCN.CNT (3b):** Počet beacon slotů v časovém rámci.
- **BCN.SLT (3b):** Beacon slot, ve kterém je příslušné BPDU posláno. Pozn.: Nultý beacon slot je určen pouze pro základní uzel.
- **BCN.CFP (10b):** Pole určuje, kdy začíná CFP interval. Jedná se o posunutí. Pokud je hodnota rovna 0, tak CFP není obsaženo v časovém rámci.
- **Reserved (1b):** Stejný účel pole jako u předešlých typů záhlaví.
- **BCN.LEVEL (6b):** Hierarchie vysílacího přepínače v síti.
- **BCN.SEQ (5b):** Sekvenční číslo BPDU v super-rámci. Pro každou BPDU je tato hodnota inkrementována základním uzlem, kde přepínač tuto hodnotu adoptuje do své beacon zprávy.
- **BCN.FRQ (3b):** Pole indikuje, jak často se beacon zprávy posílají. Jsou dostupné následující možnosti:
 - 0 = jedna beacon zpráva každý časový rámeček
 - 1 = jedna beacon zpráva každý druhý časový rámeček
 - 2 = jedna beacon zpráva každý čtvrtý časový rámeček

- 3 = jedna beacon zpráva každý osmý časový rámeček
- 4 = jedna beacon zpráva každý šestnáctý časový rámeček
- 5 = jedna beacon zpráva každý třicátý-druhý časový rámeček
- 6-7 = Rezervováno
- **BCN.SNA (48b):** Identifikátor pod-sítě, ve které se nachází přepínač, který vyslal BPDU.
- **BCN.UPCOST (8b):** Cena uplink cesty od vysílacího přepínače po základní uzel. Cena jednoho skoku je závislá na použitém modulačním schématu v daném skoku ve směru uplink. Přepínače vyšlou jejich beacon zprávu s hodnotou přijatou od jiného přepínače v uplink směru a přidají hodnotu linky na další přepínač. Pokud je hodnota větší než maximální hodnota pole, je použita maximální hodnota na dalších skocích. Možnostmi jsou:
 - 8PSK = 0
 - QPSK = 1
 - BPSK = 2
 - 8PSK s FEC = 1
 - QPSK s FEC = 2
 - BPSK s FEC = 4
- **BCN.DNCOST (8b):** Stejně jako předchozí pole, pouze se jedná o směr downlink.
- **CRC (32b):** CRC kontrolní výpočet.

BPDU se také používá pro detekci selhání přepínače ve směru uplink. Pokud servisní uzel na daný přepínač neobdrží určitý počet beacon zpráv, prohlásí daný spoj za nepoužitelný. Pokud je zároveň tento servisní uzel přepínač, přestane posílat beacon zprávy v tomto směru. Zařízení uzavře veškerá existující MAC spojení a vyhledá síť, ke které by se mohlo připojit. Pokud danou síť nalezne, začne znovu proces registrace.

7.2.11. MAC kontrolní pakety

Tyto pakety přenášejí servisní informace mezi terminály, přepínači a základním uzlem. Pakety jsou zapouzdřeny do obecného MAC rámce a jejich přítomnost je indikována pomocí pole PKT.C v záhlaví paketu. Existuje několik druhů kontrolních paketů, kde typ paketu je určen pomocí pole PKT.CTYPE. Obsah paketu je závislý na jeho typu. Jednotlivé druhy paketů jsou vyjmenovány v následující tab. 11. Podrobný popis polí kontrolních paketů je

PKT.CTYPE	Název paketu	Popis
1	REG	Správa registrace
2	CON	Správa spojení
3	PRO	Správa povýšení (promotion)
4	BSI	Indikace beacon slotů
5	FRA	Změna struktury časového rámce
6	CFP	Požadavek na CFP interval
7	ALV	Keep-alive paket
8	MUL	Správa multicastu
9	PRM	Správa robustnosti fyzické vrstvy
10	SEC	bezpečnostní informace

Tab. 11: Druhy kontrolních paketů [8]

možné nalézt v [8].

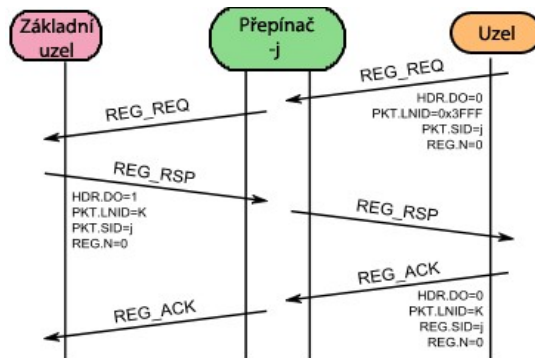
- **REG paket:** Tento typ paketu se využívá pro vyjednání registrace. Existuje několik typů tohoto kontrolního paketu jako je například Potvrzovací REG_ACK nebo požadavek REG_REQ.
- **CON paket:** Paket je využit pro vyjednání spojení. Význam se liší v závislosti na směru paketu. Využívá se při ustanovení spojení či ukončení spojení. Je zde například možnost vyjednat ARQ podporu v daném spojení.
- **PRO paket:** Zpráva se využívá pro povýšení (promotion) terminálu do stavu přepínače. Význam je závislý na směru.
- **BSI paket:** Tento typ je využíván pouze přepínači a základním uzlem. Slouží pro výměnu informací, které jsou použity daným přepínačem pro vysílání beacon zpráv.
- **FRA paket:** Paket je vyslán pomocí broadcastu do celé sítě. Je využit pro signalizaci změny časového rámce.
- **CFP paket:** Určeno pro jednorázovou alokaci kanálu v CFP intervalu pro stanici, která o to požádala.
- **ALV paket:** Signalizace keep-alive mezi servisním uzlem, nadřazeným servisním uzlem a základním uzlem.
- **MUL paket:** Využit pro správu a kontrolu členství stanice v multicast skupině.
- **PRM paket:** Využito pro kontrolu parametrů, které negativně ovlivňují přenos dat. Jsou posílány jako upozornění uzlu, že je potřeba zvýšit robustnost vysílání, nebo naopak že není potřeba využívat příliš robustní modulační schéma z důvodu vysoké kvality spoje.
- **SEC paket:** Posílány broadcastem bez šifrování. Posílá je základní uzel a přepínače do zbytku sítě za účelem distribuce náhodné posloupnosti využívané pro generování pracovních klíčů WK.

Je velmi důležité, aby nedocházelo ke ztrátám kontrolních zpráv. Zařízení, které je zainteresované ve výměně kontrolních zpráv, si udržuje čítač přeposílání těchto kontrolních zpráv a dle toho poté nastavuje svůj časovač přeposílání. V momentě, kdy je přijata odpověď na tento kontrolní paket, časovač přeposílání je zastaven. Pokud však nepřijde odpověď do vypršení časovače, je navýšen čítač a přeposlána zpráva. Jestliže se jedná o třísměrnou transakci, jako je například promotion, přeposílání funguje stejně na obou stanicích. Všechny typy kontrolních paketů jsou dále děleny v závislosti na jejich účelu a směru komunikace, jako například požadavek CFP_REQ.

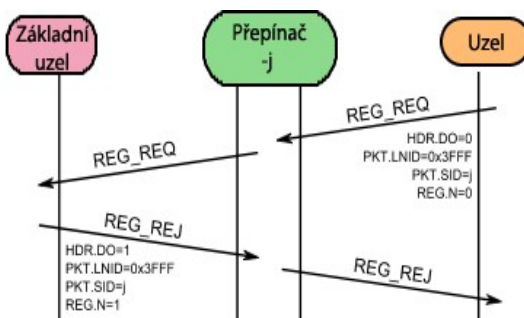
7.2.12. Popis jednotlivých procesů

Registrace

Servisní uzel, který je odpojen, se při zapnutí přesune do režimu registrace. Při tomto stavu nejprve vyšle REG paket určený pro základní uzel. Protože v této fázi uzel nemá žádné LNID nebo SID, pole v paketu PKT.LNID je nastaveno do log. 1. Pole PKT.SID je vyplněno nejbližším přepínačem v cestě. Pro všechny úspěšně schválené registrace základní uzel alokuje LNID v doméně přepínače, ke kterému je stanice připojena. LNID je poté posláno v odpovědi na registrační žádost. Jak již bylo řečeno, kombinace LNID a SID tvoří NID stanice. Registrace je třífázová. V konečné fázi se posílá potvrzení na zprávu REG_RSP, kterou vygeneroval základní uzel. Paket je vyslán bez šifrování, pouze některá pole jsou šifrována klíči založených na kontextu. Toto šifrování zabezpečuje autenticitu uzlu, vysílajícího zprávu.



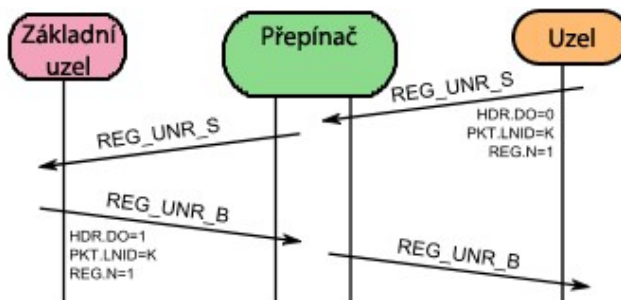
Obr. 57: Schválený proces registrace [8]



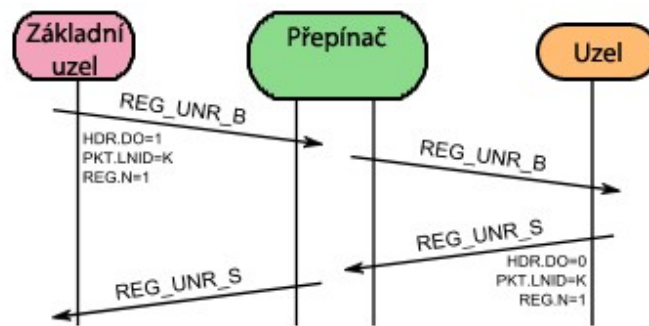
Obr. 58: Zamítnutý proces registrace [8]

Deregistrace

Stanice nebo základní uzel mohou kdykoliv spustit proces odregistrování. Stanice nebo základní uzel musejí zařízení odregistrovat, pokud přijde příslušný paket. Odpovědí je posláni potvrzení a provedou se příslušné akce k odstranění dané stanice ze sítě. Zdroje, které byly použity u předešlé stanice, se použijí pro novou stanici.



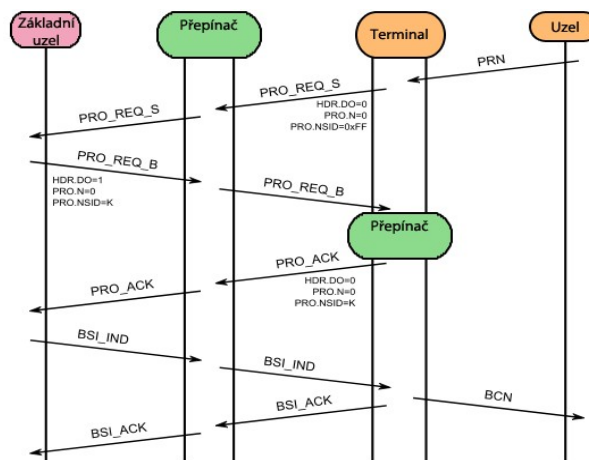
Obr. 59: Proces deregistrace iniciovaný terminálem [8]



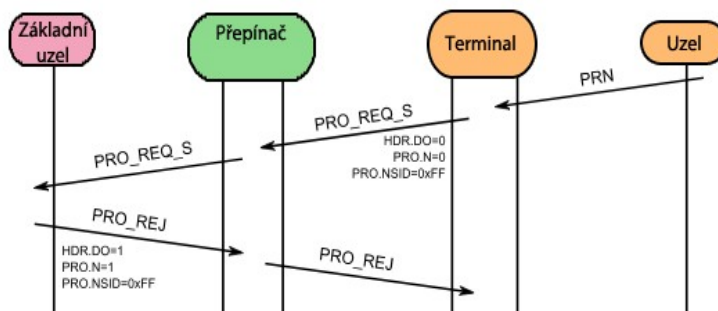
Obr. 60: Proces deregistrace iniciovaný základním uzlem [8]

Povýšení

Uzel, který se nemůže spojit s žádným přepínačem, může zaslat rámec vyžadující povýšení proto, aby byl nejbližší terminál povýšen do stavu přepínače. Terminál obdrží rámec PNPDU a na jeho základě vygeneruje paket žádosti o povýšení PRO-REQ, který pošle na základní uzel. Pokud se základní uzel rozhodne některý z terminálů povýšit, odešle odpověď danému uzlu. Ostatní stanice nedostanou žádnou odpověď z důvodu ulehčení cirkulace dat v síti. V žádosti o povýšení jsou všechny bity pole PRO.NSID ve zprávě PRO_REQ_S nastaveny do 1. Zařízení, které je povýšeno odesílá potvrzení PRO_ACK, to zároveň signalizuje ostatním nadřazeným přepínačům, že je v síti nová povýšená stanice a dle toho si upraví svojí přepínací tabulku.



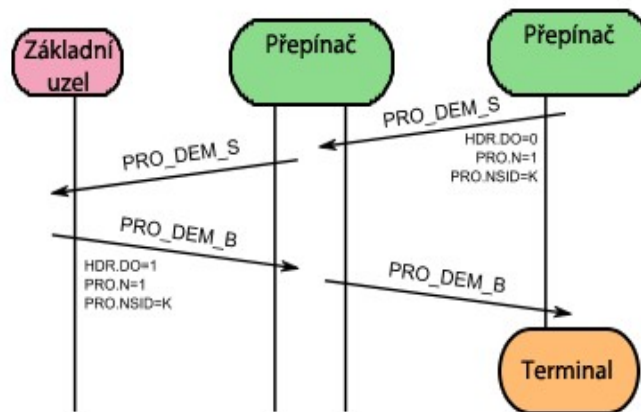
Obr. 61: Proces povýšení iniciovaný servisním uzlem [8]



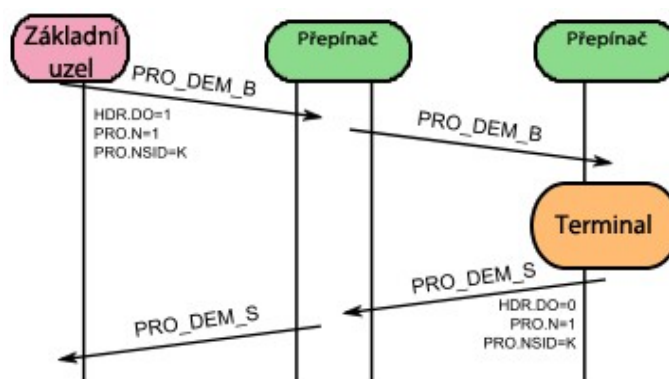
Obr. 62: Proces povýšení zamítnutý základním uzlem [8]

Degradace

Přepínač nebo základní stanice se mohou v jakýkoliv okamžik rozhodnout, že již dále nebude daná stanice ve funkci přepínače. Využívá se přitom PRO kontrolního paketu. Pole RO.NSID obsahuje SID přepínače, který bude degradován. V doporučení není definován mechanismus zamítnutí této žádosti.



Obr. 63: Degradace iniciována servisním uzlem [8]



Obr. 64: Degradace iniciována základním uzlem [8]

Keep-Alive

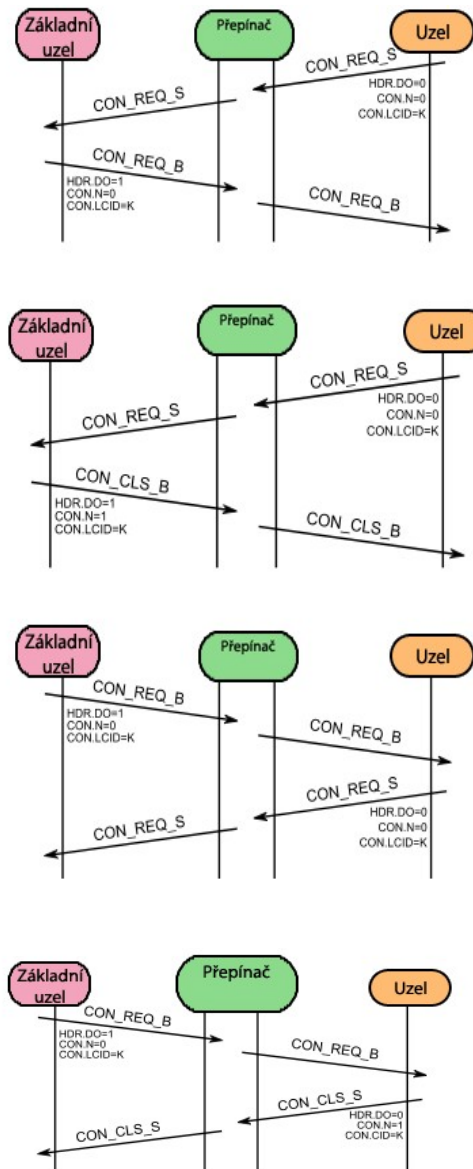
Tento mechanismus je použit pro detekci, zda zařízení opustilo síť z důvodu změn v síti či nějaké zásadní chyby. V okamžiku, kdy stanice obdrží odpověď na registraci REG_RSP, využije pole ze záhlaví ke spuštění časovače. Při každém přijetí zprávy ALV_B se časovač restartuje s použitím hodnoty nesené v této zprávě a pošle odpověď základnímu uzlu. Když časovač vyprší, stanice usoudí že byla odregistrována základním uzlem. Zpráva PRO_REQ také restartuje časovač.

Každý přepínač po cestě zprávy ALV_B si kopíruje pole s časovou značkou pro přepínače pod ním v hierarchii. Pokud přepínač neobdrží ALV_S zprávu než vyprší časovač, vymaže záznam z přepínací tabulky. Zároveň se inkrementují hodnoty dvou čítačů, jeden je pro příjem ALV zpráv a druhý pro odeslané ALV. Při registraci se čítače nulují.

Správa spojení

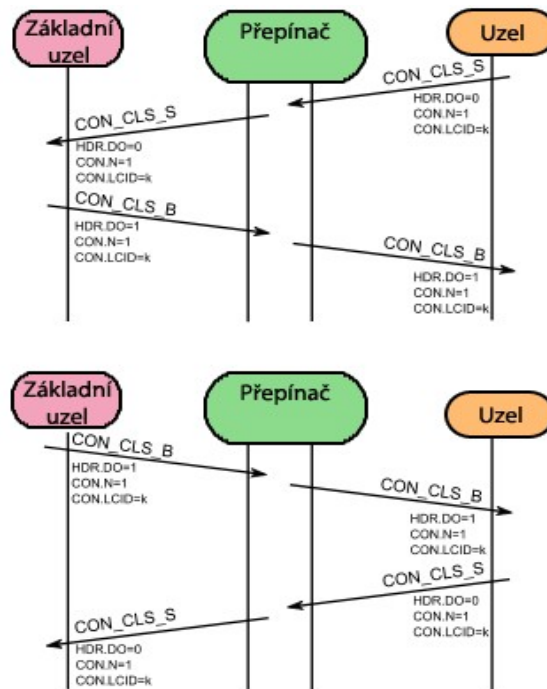
Ustanovené spojení u PRIME sítě je typu konec-konec. Vlivem stromové struktury sítě

je na jednom konci základní uzel a na druhém servisní uzel. V některých případech je nutné ustanovit spojení mezi dvěma servisními uzly. Takové spojení se nazývá přímé. Zprávy pro ustanovení spojení se nazývají CON. Při úspěšném spojení je základním uzlem alokováno LCID, které je unikátní pro dané LNID.



Obr. 65: Ustanovení spojení a) iniciováno servisním uzlem; b) zamítnuto základním uzlem; c) iniciováno základním uzlem; d) zamítnuto servisním uzlem [8]

Zrušení spojení může být provedeno základním uzlem či servisní stanicí v jakýkoliv okamžik. Před tím, než je spojení pokládáno za ukončené, musí protější stanice potvrdit příjem požadavku na ukončení.



Obr. 66: Ukončení spojení a) iniciováno servisním uzlem; b) iniciováno základním uzlem; [8]

Správa multicastu

Připojení či odpojení od multicast skupiny může být iniciováno základním nebo servisním uzlem. Pro správu multicastu se využívají MUL pakety, které jsou typu unicast mezi základním uzlem a servisním uzlem. Stanice, která zahájí proceduru připojování k multicast skupině, musí nejprve řádně dokončit tento proces a až poté může zahájit nový proces tohoto typu. Některé aplikace vyžadují pozvání od základního uzlu, v tomto případě základní uzel vytvoří skupinu a rozešle pozvánky. Opouštění skupiny funguje na stejném principu jako ukončování spojení.

Správa robustnosti fyzické vrstvy

Fyzická vrstva obsahuje dva parametry, jimiž lze ovlivňovat výkonnost přenosu. Parametry jsou:

- Výkon vysílání
- Modulační schéma (mapování do konstelačního diagramu a konvoluční kódování)

Vysílač pro úpravu těchto parametrů potřebuje zpětnou vazbu, která je posílána pomocí PRM paketů. Pro zpětnou vazbu a následné nastavení vysílacích parametrů se využívá několik indikátorů:

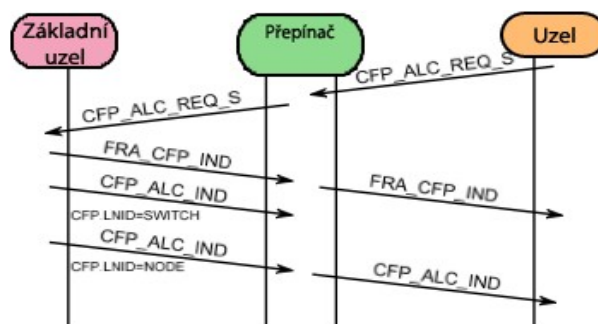
- Přijaté pakety s neplatným CRC
- ARQ přeposílání

- Přeposílání kontrolních paketů
- Žádost PRM, které byla poslána ostatními uzly na přepínač.
- PRM odpovědi

PRM_REQ zprávu může vyslat jak servisní uzel, tak přepínač. Pravidlo pro změnu robustnosti je následující:

- Zvýšení: Zvýšit vysílací výkon, a pokud to není možné, změnit modulační schéma.
- Snížení: Změnit modulační schéma, a pokud to není možné, snížit vysílací výkon.

Alokace a dealokace kanálu



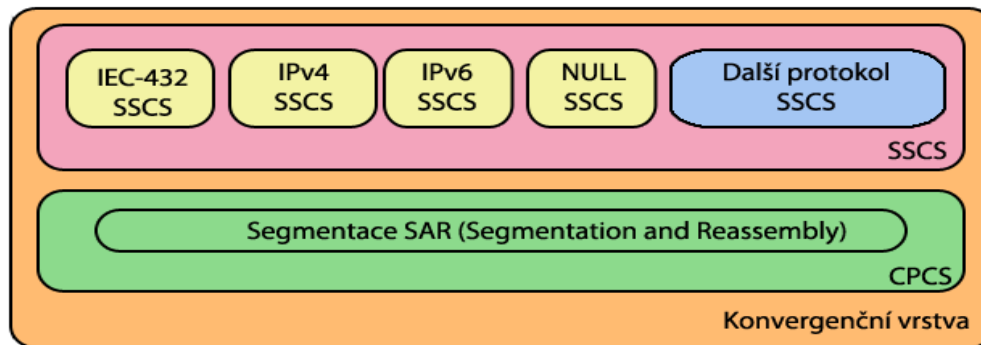
Obr. 67: Úspěšná alokace CFP periody [8]

Předchozí obr. 67 zobrazuje úspěšnou alokaci CFP kanálu. Všechny požadavky na alokaci jsou směřovány na základní uzel. Základní uzel poté alokuje nepřekrývající se časové intervaly po celé délce cesty ve víceúrovňové síti, nicméně základní uzel může využít již použité časové intervaly na odlišných úrovních.

7.2.13. Přeposílání ARQ

Zařízení fungující dle standardu PRIME mohou využívat přeposílání dat ARQ. Nicméně stanice nemusejí tento mechanismus využívat, a to z důvodu zjednodušení. Zda bude tento mechanismus využit, se řeší při vyjednávání parametrů spojení v paketu CON. Pokud obě zařízení souhlasí s mechanismem, ARQ mechanismus je využit pro potvrzování zpráv. Mechanismus pracuje na bázi konec-konec. Využívá se unikátního identifikátoru paketu, který je dlouhý 6 bitů. Okno ARQ je dlouhé 5 bitů.

7.2.14. Konvergenční vrstva



Obr. 68: Struktura konvergenční vrstvy [8]

Struktura konvergenční vrstvy je znázorněna na obr. 68. Vrstva má za úkol klasifikaci přenosů a jejich spojování na vhodný komunikační profil, poskytuje funkce MAC vrstvy a přiděluje šířku pásma. Vrstva je rozdělena na dvě podvrstvy; první z nich se nazývá SSCS (*Service Specific Convergence Sublayer*) a obsahuje služby, které jsou specifické pro daný komunikační profil a jsou poskytovány vyšším vrstvám. Služby pro daný komunikační profil na této vrstvě jsou například IPv4 SSCS, IPv6 SSCS atd. Druhá podvrstva se nazývá CPCS (*Common Part Convergence Sublayer*) a jejím úkolem je segmentace a opětovné sestavování dat. CPCS je pouze jedna oproti několika SSCS; služby poskytované touto vrstvou mohou být využity SSCS pouze částečně.

7.2.15. CPCS podvrstva

Pro všechna modulační schémata je délka segmentu stejná. Pro zvýšení efektivity je možná agregace několika segmentů do jednoho PPDU. Při tomto procesu je přidáno záhlaví dlouhé jeden bajt pro každý segment. První dva bity jsou určeny pro identifikaci typu segmentu. Struktura dalších polí je závislá na typu segmentu. Struktura záhlaví je na následujícím obr. 69.



Obr. 69: Struktura záhlaví segmentace [8]

- **SAR.TYPE (2b):** Pole udává typ segmentu, kde jsou možné následující kombinace:
 - 00: První segment
 - 01: Prostřední segment
 - 10: Poslední segment
 - 11: Rezervováno ITU-T
- **SAR.NSEGS (6b):** Počet segmentů - 1
- **SAR.SEQ (6b):** Sekvenční číslo segmentu

Každý segment (kromě prvního) obsahuje sekvenční číslo, aby bylo následně při spojování segmentů možné detekovat ztrátu segmentu. Na přijímací straně se všechny

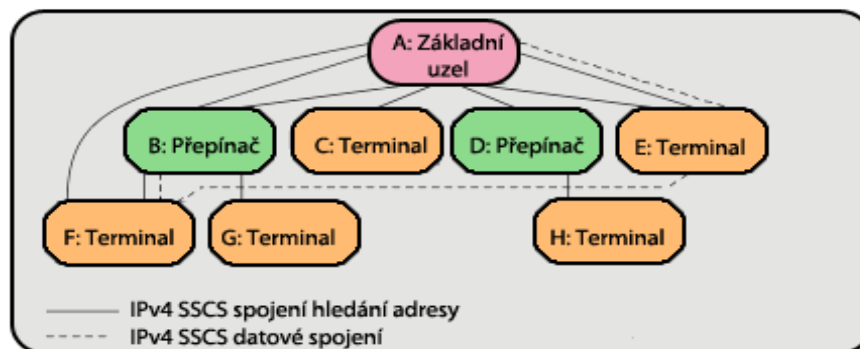
segmenty daného SDU ukládají do zásobníku a SSCS vrstvě je doručen pouze celý spojený SDU.

7.2.16. NULL SSCS podvrstva

Tato část podvrstvy SSCS poskytuje MAC vrstvě transparentní přístup k vyšším vrstvám. Je určena pro aplikace, které nevyžadují žádné specifické konvergenční služby a režie této vrstvy je minimální.

7.2.17. IPv4 SSCS podvrstva

Služby této podvrstvy poskytují efektivní přenos IPv4 paketů přes PRIME síť. Servisní uzel může posílat IPv4 data na základní uzel nebo na jiné servisní stanice. Základní uzel funguje jako směrovač mezi PRIME sítí a jiným typem sítě. Základní stanice může také provádět NAT funkce. Servisní stanice mohou mít adresu nakonfigurovanou staticky či dynamicky přes DHCP. Základní uzel poté provádí hledání adresy pomocí IPv4 a EUI-48 a udržuje databázi IPv4 a EUI-48 adres. Přesto, že v klasické IP síti jsou nespojově orientované, u PRIME je nutné vytvořit spojení mezi zdrojovým a cílovým uzlem. Spojení je udržováno po dobu přenosu dat. Pro zjednodušení funkce je možné mít pouze jednu cestu na lokální IPv4 adresu. Podvrstva má mnoho typů spojení. Pro zjištění adresy je realizováno spojení mezi servisním uzlem a základní stanicí. Pro data je možné mít pouze jedno spojení na cílovou stanici. Základní uzel funguje jako brána v případě, že cílová stanice leží mimo síť nebo v PRIME síti. CPCS vrstva je pro funkci IPv4 SSCS nezbytná. Broadcast a multicast je podporován skrze MAC rámce.



Obr. 70: Příklad IPv4 SSCS spojení [8]

Na obr. 70 mají uzly B, E a F spojení se základním uzlem pro zjištění adresy. Uzel E má dále spojení pro přenos dat na základní uzel a uzel F. Uzel F má datové spojení na uzel B.

7.2.18. IEC 61334-4-32 SSCS podvrstva

Tato část SSCS umožňuje výměnu zpráv mezi PRIME aplikacemi a externími aplikačními klienty využívající IEC 61334-4-32. Komunikaci může zahájit pouze servisní uzel a může komunikovat pouze se základním uzlem. Každé 4-32 spojení je identifikováno pomocí AUI (*Application Unique Identifier*).

7.2.19. IPv6 SSCS podvrstva

Podvrstva poskytuje efektivní přenos IPv6 paketů po PRIME síti. Servisní uzel může posílat a přijímat data na základní uzel nebo přímo na některý ze servisních uzlů. Základní uzel funguje jako směrovač mezi ITU-T G.9904 sítí a páteřní sítí. Základní uzel může také fungovat ve funkci NAT směrovače, nicméně vlivem rozsáhlého adresového prostoru IPv6

není využití NAT funkcí předpokládáno. PRIME podporuje automatickou bez-stavovou konfiguraci nebo stavovou konfiguraci adres. Adresa může být také nastavena manuálně. Pakety jsou směrovány v závislosti na NID. Adresa je opět jako u IPv4 spojena s EUI-48 identifikátorem.

Základní uzel opět udržuje tabulku IPv6 adres spjatých s EUI-48 adresami. Každý servisní uzel si musí svoji IP adresu zaregistrovat u základního uzlu. Ostatní servisní uzly se poté dotazují základního uzlu na příslušnou cílovou IP adresu.

Na konvergenční vrstvě se realizuje mnoho spojení, kde jedno je vyhrazeno pro základní uzel. Je možné udržovat pouze jedno spojení zdroj-cíl. Směrování paketů je v režii konvergenční vrstvy. Pro funkci IPv6 SSCS je nutná CPCS vrstva. Spojení je spojově orientované stejně tak jako u IPv4 SSCS.

Pro bezstavovou autokonfiguraci adresy je využita transformace EUI-48 na EUI-64 stejně, jako je definováno v doporučení IETF RFC 2464. Dynamická konfigurace je prováděna pomocí DHCPv6. Stanice podporují také multicast adresaci. QoS je podporována pro 4 úrovně.

7.2.20. Aktualizace firmware

Schopnost aktualizace software je implementována v zařízeních podporující standard ITU-T G.9904. Mechanismus je součástí roviny určené pro správu a využívá NULL SSCS. Pro kontrolní zprávy je využíváno pouze unicast spojení, ale data mohou být vysílána pomocí multicast. Aktualizace může být zrušena v jakýkoliv okamžik a po instalaci je nějaký čas možné vrátit se zpět ke starší verzi.

7.3. Zabezpečení

Služby poskytované k zabezpečení komunikace na MAC vrstvě jsou:

- **Ověření**
- **Integrita dat**

Všechny pakety musejí používat vyjednaný bezpečnostní profil, jedinou výjimkou paketů bez zabezpečení jsou REG a SEC kontrolní pakety. PRIME implementuje několik bezpečnostních profilů tak, aby bylo možné pokrýt různé nároky na zabezpečení.

Bezpečnostní profil 0

Tento profil umožňuje přenos dat mezi uzly v nezabezpečené podobě. Profil je použitelný pro aplikace, kde je bezpečnost zajištěna vyšší vrstvou nebo u aplikací, kde bezpečnost není klíčovým parametrem.

Bezpečnostní profil 1

Tento profil využívá 128-bitovou AES šifru s CRC kontrolním výpočtem. Profil splňuje veškeré nároky na bezpečnost:

- Důvěrnost dat zaručena šifrováním a tajným klíčem.
- Ověření autentičnosti je garantováno vlastnictvím tajného klíče na každém uzlu, který zná pouze příslušný uzel a základní uzel.
- Integrita dat je zajištěna CRC mechanismem.

Šifrovací mechanismus AES je popsán v doporučení PUB 197. Jedná se o blokové

šifrování, kde jsou data rozdělena na 128-bitové bloky. Na tyto bloky je poté aplikován šifrovací algoritmus.

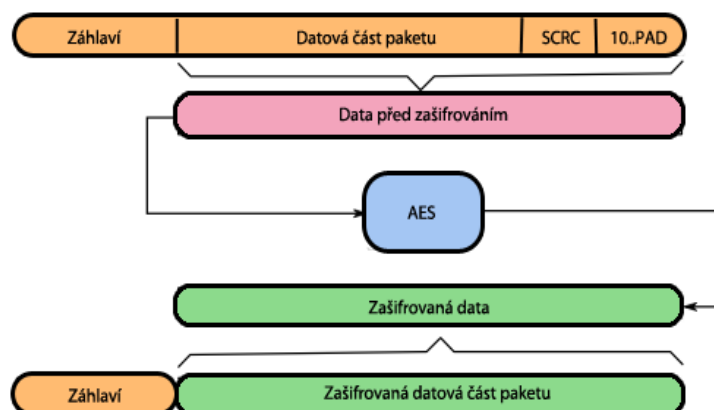
Vyjednání bezpečnostního profilu probíhá při registraci zařízení do sítě. Všechna data a signalizační PDU po vyjednání využívají stejný bezpečnostní profil. Ve zprávě pro registraci je pro signalizaci profilu využito pole REG.SPC, kde pokud základní uzel souhlasí s registrací a navrhovaným bezpečnostním profilem, pošle odpověď ze stejnou hodnotou daného pole v záhlaví. Základní uzel může souhlasit s registrací, ale v poli bude hodnota 0, což značí využití prvního typu bezpečnostního profilu. Obecně terminály nejprve při registraci využívají nejzabezpečenější profil a poté, pokud tato možnost je odmítnuta ze strany základního uzlu, vyjednává se využití méně zabezpečeného profilu.

Hierarchie klíčů

Pro zabezpečení servisní a základní uzel využívají skupinu tří klíčů. Jednotlivé typy klíčů a jejich využití je následující:

- **Initial Working Key (WK0):** Má limitované použití a využívá se pro dešifrování REG_RSP zprávy. Tento klíč využívá servisní uzel v odpojeném režimu.
- **Working Key (WK):** Klíč se využívá pro šifrování všech zpráv při unicast komunikaci. Každý uzel má svůj unikátní WK, který zná pouze daný uzel a základní uzel.
- **Subnetwork Working Key (SWK):** Klíč je sdílený celou sítí. Klíč je pro zajištění bezpečnosti vypočítán z ostatních klíčů, které jsou obsaženy v zašifrované zprávě REG a v nešifrované zprávě SEC. Klíč je použit pro broadcast, multicast a přímé spojení dvou uzlů.

Klíče WK a SWK mají omezenou platnost v závislosti na náhodně vygenerované posloupnosti. Posloupnost je generována a distribuována pomocí základního uzlu v SEC paketu. Tato zpráva je posílána po určitém časovém úseku, a pokud zařízení neobdrží aktualizaci do určité doby, klíče jsou dále považovány za neplatné a servisní stanice musí provést opětovnou registraci.

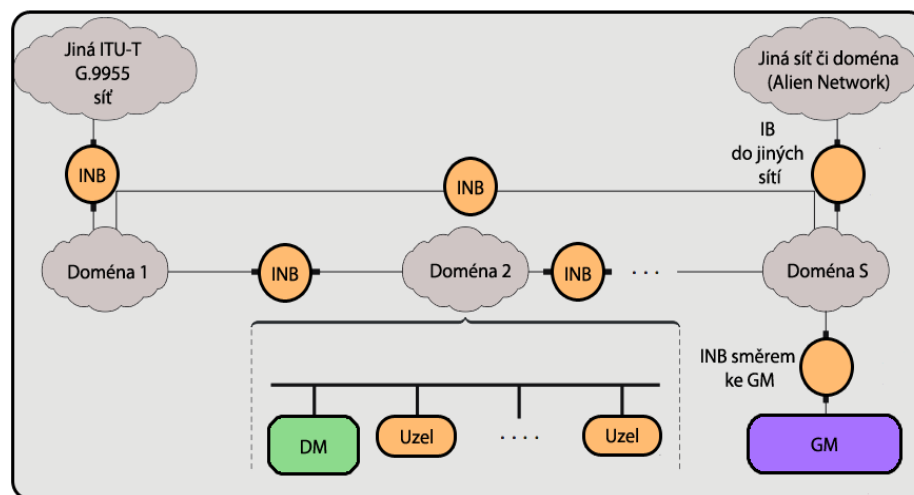


Obr. 71: Algoritmus bezpečnostního profilu 1 [8]

8. ITU-T G.hnem

Doporučení ITU-T G.9902 popisuje fyzickou a spojovou vrstvu. Síť je rozdělena do domén. Domény jsou pouze logickým rozdělením a mohou se překrývat. Některé uzly mohou komunikovat s více doménami. Každá doména je označena pomocí domain ID, které je unikátní v rámci sítě. Uzly mimo příslušnou doménu mohou komunikovat s jinou doménou pomocí INB (*Inter domain Bridge*) zařízení. Síť může také obsahovat cizí doménu, neboli „Alien Domain“. Propojení G.hnem a Alien domény se provádí pomocí L3 zařízení. Operace v jednotlivých doménách je řízena pomocí GM (*Global Master*) zařízení.

Doménou se rozumí seskupení uzlů, které jsou připojeny ke stejnému médium typicky elektrickému vedení. Každý uzel v doméně je identifikován pomocí unikátního ID uzlu. Uzly v jedné doméně spolu mohou komunikovat přímo nebo přes ostatní uzly, které se ve funkci přeposílání nazývají RA (*Relay Node*). Síť založená na G.hnem podporují mesh topologii, která umožňuje komunikaci všech uzlů mezi sebou.

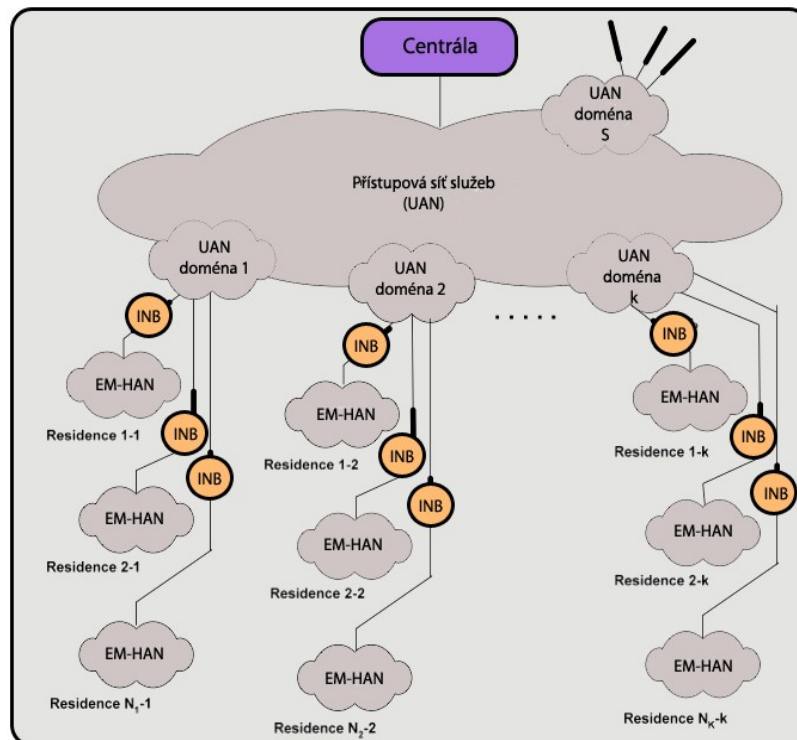


Obr. 72: Obecná architektura sítě [9]

Síť typu G.hnem lze využít například pro takzvaný EM (*Energy Management*). Ukázka topologie EM sítě je na obr. 73. EM síť se skládá z centrály, která spravuje danou službu (voda, plyn, elektřina), přístupové mezi-doménové uživatelské sítě UAN (*Utility Access Network*) a domácí oblasti EM-HAN (*Energy Management Home Area Network*) sítě v prostorách uživatelů. Každá EM-HAN může obsahovat jednu nebo více domén. Doména UAN obsahuje veškerá zařízení, která fyzicky patří do UAN sítě, jako například elektroměry. Síť HAN obsahuje veškerá zařízení, jež vlastní uživatel, a také zařízení určená pro správu služeb, jako jsou programovatelné termostaty či podpůrná zařízení pro elektrická vozidla.

Koexistence s ostatními PLC standardy

Jsou definovány tři mechanismy pro podporu koexistence s jinými PLC architekturami operujícími ve stejném rozmezí frekvencí. Prvním mechanismem je mechanismus frekvenčního dělení FD (*Frequency Division*), který dovoluje koexistenci s FSK/PSK PLC systémy. Dalším mechanismem je tzv. Frequency Notching. Mechanismus je využit pro potlačení interference z G.hnem zařízení v úzkém pásmu frekvencí. To se provádí filtrací jedné nebo více subnosných. Posledním mechanismem je koexistenční mechanismus Preamble.



Obr. 73: Obecná EM architektura sítě [9]

8.1. Doména

Domény HAN a UAN se skládají z uzlů, přičemž jeden je vždy GM a ostatní jsou koncovými. Koncové uzly obsahují většinou pouze základní funkce. Přeposílající a GM uzly mají rozšířený obsah funkcí. Funkcí DM je koordinace a správa ostatních zařízení příslušejících do dané domény. V doméně je pouze jeden aktivní DM. Jednotlivé domény se mohou navzájem překrývat. Veškeré uzly v dané doméně jsou povinny zahazovat data s jiným doménovým ID, pokud se nejedná o zařízení INB. Komunikace v doméně může probíhat třemi způsoby:

- **Komunikace bod-bod (P2P):** Komunikace probíhá přímo mezi dvěma uzly uvnitř domény, a pokud je cílová stanice mimo doménu, data se posílají na INB.
- **Centralizovaný mód komunikace (CM):** Komunikace se nejprve posílá na uzel DAP (*Domain Access Point*) a poté dále na cílovou stanici. DAP přímá data od všech uzlů v síti. Obvykle je zařízení DAP také DM. Pokud uzel, který „chce“ komunikovat, není přímo připojen na DAP, využije k přenosu jiného bližšího uzlu, jenž přeposílá data.
- **Unifikovaný mód komunikace (UM):** Uzly mohou komunikovat s cílovou stanicí buď přímo nebo přes jeden a více uzlů, které přeposílají data.

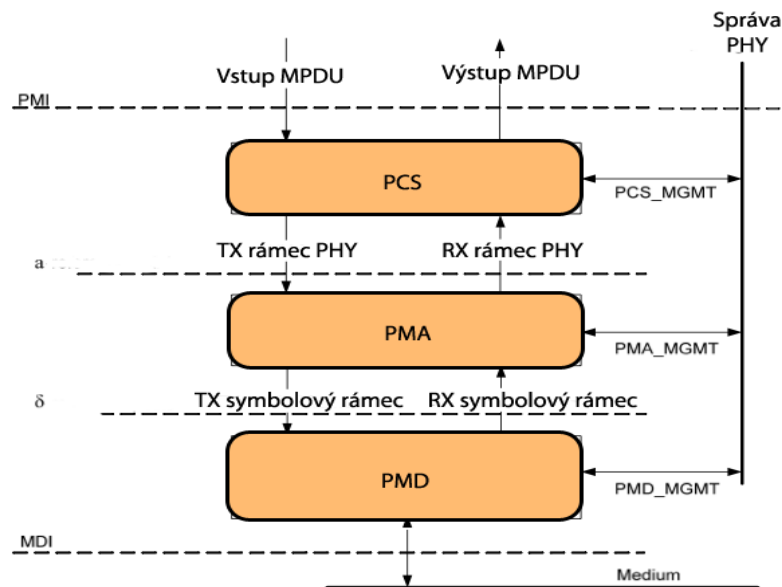
DM uzel řídí doménu pomocí beacon a řídicích zpráv. Beacon rámce nesou informace určené pro všechny uzly v dané doméně. Obsahují například frekvenční plány, ID domény, bezpečnostní informace atd. Uzly, které přijmou beacon rámce, si nastaví příslušné parametry dle rámců. DM zodpovídá za povyšování uzlů do role směrovačů RA a dále na beacon proxy servery. Tyto servery jsou uzly, které zodpovídají za přeposílání beacon zpráv. Hlavní funkce DM:

- Periodické rozesílání beacon rámců
- Určování pravidel v příslušné doméně
- Kontrola přístupu
- Registrace nových uzlů
- Odstraňování uzlů, co poruší pravidla dané domény
- Správa topologie
- Sběr statistik

8.2. Kvalita služeb QoS

Zařízení přiřazují jednotlivá PDU do příslušných front v závislosti na prioritě dat. V závislosti na vlastnostech přístupu k mediu těchto front jsou poté PDU odbavována a posílána do sítě. Počet podporovaných úrovní priorit je závislý na komunikačním profilu a může to být 2, 3 nebo 4. Standardní komunikační profil podporuje 4 úrovně priorit, kde 0 je nejméně významná úroveň a 2 nejvyšší. Poslední úroveň 3 je vymezena pouze pro beacon rámců a není možné posílat aplikační data s touto prioritou. Data určená pro správu sítě mají úroveň 2.

8.3. Fyzická vrstva



Obr. 74: Model fyzické vrstvy [9]

Fyzická vrstva je rozdělena na tři podvrstvy. Na obr. 74 je zobrazen funkční model fyzické vrstvy. PMI a MDI jsou referenční body, které oddělují fyzickou vrstvu od spojové vrstvy a fyzického media. Ve směru posílání dat vstupují MPDU přes PMI do bloku PCS (*Physical Coding*) fyzické vrstvy. V tomto bloku se provádí mapování MPDU do rámce fyzické vrstvy, kontrola toku a adaptace bitové rychlosti mezi MAC a PHY vrstvou. Poté tento rámec vstupuje do bloku PMA (*Physical Media Attachment*), které provádí scrambling, prokládání, opravu chyb pomocí FEC, segmentaci dat pro mapování do OFDM a vyplňování segmentu nulami. Takto zpracovaná data dále vstupují do bloku PMD (*Physical Medium Dependent*). Zde se provádí tónové mapování, OFDM modulace a pro potřeby

synchronizace se zde přidává preamble a provádí se funkce CES (*Channel Estimation Symbols*).

8.3.1. PCS podvrstva

Formát rámce fyzické vrstvy je zobrazen na obr. 75. Kompletní rámec se skládá z preamble, záhlaví fyzické vrstvy, CES pole a datové části. Počet OFDM symbolů záhlaví se odvíjí od frekvenčního plánu a předdefinovaného kódování modulačního schématu. Jako u PRIME a G3 záhlaví a datová část mohou být modulovány a kódovány odlišným způsobem. MPDU jsou mapovány do PHY rámce od LSB do MSB po bajtech.

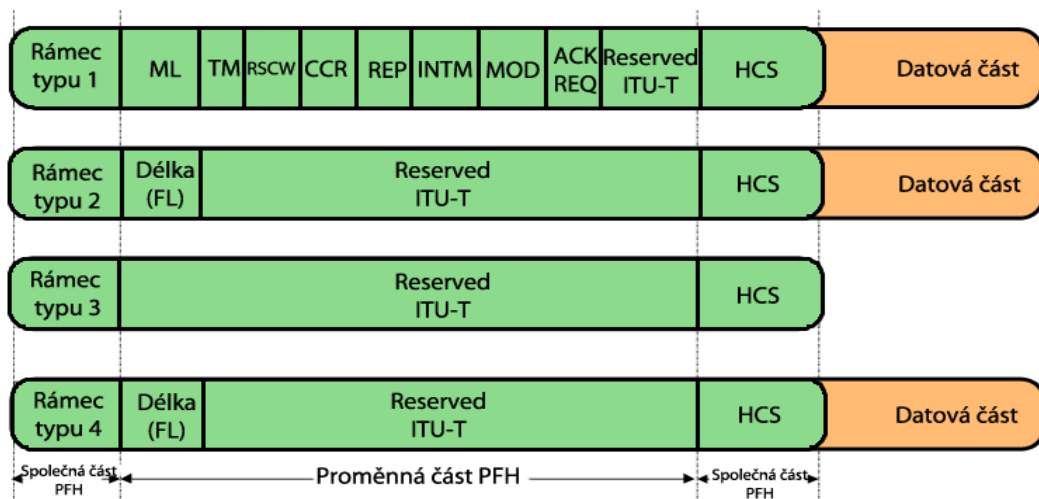


Obr. 75: Struktura rámce fyzické vrstvy [9]

Existuje několik typů rámců:

- **Typ 1:** Rámec obsahuje uživatelská data či data pro správu
- **Typ 2:** Rezervováno ITU-T
- **Typ 3:** Rámec neobsahuje žádnou datovou část
- **Typ 4:** Rezervováno ITU-T

Záhlaví fyzické vrstvy se dělí na dvě části, kde jedna je společná pro všechny typy rámců a druhá se mění v závislosti na typu rámce. Struktura záhlaví je zobrazena na obr. 76. Pole FT a HCS patří do společné části záhlaví.



Obr. 76: Struktura záhlaví fyzické vrstvy [9]

- **FT (2b):** Pole indikuje typ rámce následovně:
 - 00: Typ 1
 - 01: Typ 2
 - 10: Typ 3
 - 11: Typ 4

- **ML (8b):** Pole indikuje délku datové části v bajtech a s využitím logaritmického měřítka.
- **FL (7b):** Pole signalizuje dobu trvání rámce v OFDM symbolech.
- **TM (8b):** Indikace, jaká tónová maska je použita pro datovou část. Signalizuje, jaké frekvence jsou aktivní a jaké neaktivní pro přenos dat. Spektrum je rozděleno do skupin tónů (frekvencí) v závislosti na frekvenčním plánu. Každý bit tohoto pole indikuje, zda je určitá skupina tónů aktivní (1) či ne (0).
- **RSCW (1b):** Maximální hodnota délky kódového slova RS, která byla použita pro kódování datové části. Existují dvě možnosti:
 - 0: RS=239 bajtů
 - 1: RS=128 bajtů
- **CCR (1b):** Kódový poměr konvolučního kodéru pro datovou část. Existují dvě možnosti:
 - 0: poměr je 1/2
 - 1: poměr je 2/3
- **REP (3b):** Signalizace, kolikrát bude provedeno opakované vysílání datové části. Maximální počet opakování je 12.
- **INTM (1b):** Pole určuje, jaký mód prokladače byl použit.
- **MOD (2b):** Typ modulace použitý pro datovou část.
- **ACK REQ (2b):** Určuje, zda je vyžadováno potvrzení o přijetí ACK.
- **Reserved by ITU-T (?b):** Délka je závislá na typu rámce a bity jsou rezervovány ITU-T pro budoucí použití. Pro rámec typu jedna je délka stanovena na 3 bity.
- **HCS (12b):** Cyklická redundantní 12-bitová kontrola CRC, je počítána ze všech polí záhlaví.

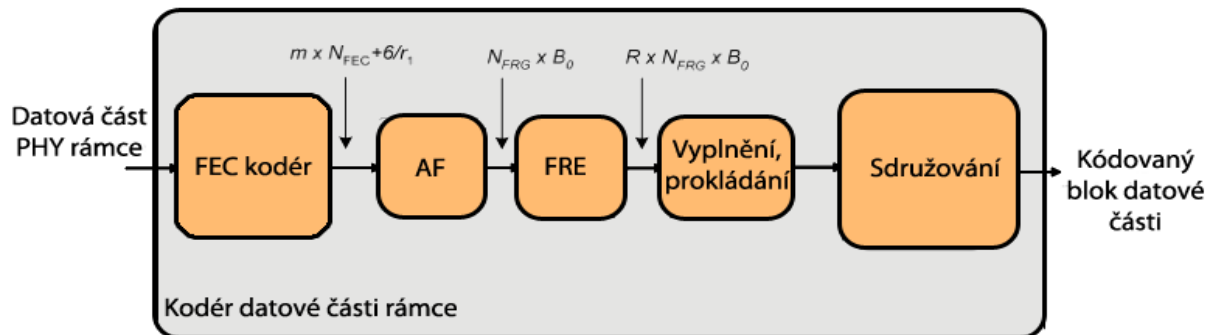
8.3.2. PMA podvrstva

Rámec fyzické vrstvy zde nejprve vstupuje do scrambleru a poté záhlaví a datová část rámce jsou kódovány zvlášť pomocí FEC kodéru a prokládány. V poslední řadě jsou obě části namapovány do OFDM symbolů. Scrambler je totožný jako u standardu PRIME a G3. FEC kodér se skládá z vnějšího RS kodéru (255,239) a konvolučního kodéru délky 7 s kódovým poměrem $\frac{1}{2}$ nebo $\frac{2}{3}$. Struktura kodéru je opět stejná jako u předchozích standardů. Parametry FEC jsou uvedeny v následující tabulce:

RS délka informačního bloku K [Bajt]	Kódový poměr r	RS paritní bity R=2t
≤25	$\frac{1}{2}$ nebo $\frac{1}{3}$	0
26-50		4
51-75		8
76-100		12
101-239		16

Tab. 12: Parametry FEC kódování [9]

Kde délka RS informačního bloku jsou vstupní data, která vstupují do RS kodéru a jsou rozdělena na bloky o určité velikosti. Symbol „t“ značí počet bajtů, které lze opravit. Pro záhlaví fyzické vrstvy je konvoluční kodér vypnut. Kódování datové části je rozděleno na bloky následovně:



Obr. 77: Blokové schéma kodéru datové části [9]

Data po výstupu z FEC a konvolučního kodéru vstupují do sdružovacího a fragmentačního bloku AF (*Aggregation and Fragmentation block*), dále pak do bloku FRE (*Fragment Repetition Encoder*) a v poslední řadě do prokladače. FRE blok je zde pro podporu robustního komunikačního režimu a v případě normálního režimu je transparentní. AF blok shromažďuje bloky kódových slov FEC generované kodérem a tyto bloky jsou rozděleny do fragmentů o stejné velikosti. Délka fragmentu je určena z celkové délky kódového slova FEC. Maximální hodnota fragmentu může být 3072 bitů. Poté tyto fragmenty vstupují do bloku FRE, který několikrát zopakuje daný fragment a všechny kopie vloží do zásobníku fragmentů FB (*Fragment Buffer*). Počet kopií určuje pole REP v záhlaví fyzické vrstvy, kde jsou možná opakování $R=1, 2, 4, 6, 12$. V posledním kroku všechny fragmenty a jejich kopie vstupují do prokladače. Prokladač může operovat ve dvou režimech:

- **Prokládání po fragmentu:** Každý fragment zásobníku fragmentů je prokládán zvlášť.
- **Prokládání po AC cyklu:** Každý zásobník fragmentu je vyplněn bity na vhodnou velikost. Doplnění je vytvořeno zopakováním prvních bitů stejného zásobníku fragmentů. Data jsou poté proložena.

Data poté vstupují do sdružovacího bloku. Tento blok spojuje zakódovaná data do větších celků. Kódování záhlaví fyzické vrstvy probíhá stejným způsobem akorát s tím rozdílem, že zde není implementován sdružovací blok.

Prokladač prokládá bloky bitů v závislosti na zvoleném počtu subnosných. Subnosné jsou určeny v záhlaví fyzického rámce v poli TM. Prokladač provádí totožnou funkci jako u předchozích standardů PRIME a G3. V další fázi dochází k mapování dat do symbolů.

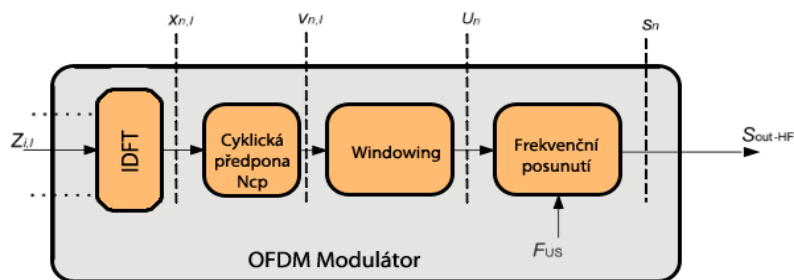
8.3.3. PMD podvrstva

Nejprve jsou zde jednotlivé rámce symbolů rozděleny v bloku TM (*Tone Mapper*) na skupiny bitů a jsou přiřazeny k jednotlivým subnosným v závislosti na alokační tabulce BAT (*Bit Allocation Table*). Existují dva typy subnosných. Prvním typem jsou maskované subnosné MSC. Na těchto frekvencích není povoleno vysílat data. MSC se dále dělí na permanentně maskované nebo regionálně maskované. Druhým typem jsou podporované subnosné SSC, kde je povoleno vysílat. Dělí se na aktivní, neaktivní a pilotní. Na neaktivních frekvencích se vysílá pseudonáhodná posloupnost. Dále jsou definovány dva způsoby mapování. V prvním případě je BAT tabulka definována vysílací stanicí, kde tabulka je předdefinována nebo rozeslána všem stanicím. Druhým způsobem je BAT definována přijímací stanicí. V tomto případě je BAT tabulka rozeslána v rámci určování parametrů

kanálu.

Data poté vstupují do bloku CE (*Constellation Encoder*), který převede skupinu bitů na komplexní číslo. Toto číslo reprezentuje bod v konstelačním diagramu. Nepoužité a pilotní nosné jsou modulovány pseudonáhodnou posloupností. Počet bitů ve skupině a pořadí subnosných je závislé na BAT tabulce. Modulace používané G.hnem jsou BPSK, QPSK a 16-QAM. Po výstupu z konstelačního kodéru je upraven zisk.

Následujícím blokem je OFDM modulátor, který vstupní bitový tok komplexních čísel převede na komplexní časové vzorky. Zároveň se v tomto bloku přidává CES a preamble. Blok se skládá z několika částí zobrazených na obr. 78.

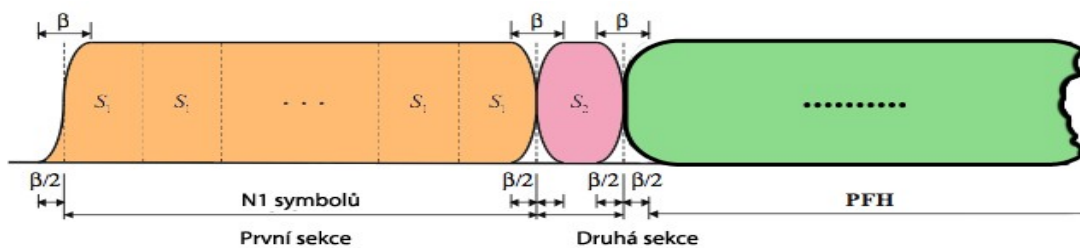


Obr. 78: Blokové schéma OFDM modulátoru [9]

Nejprve je tok komplexních dat převeden pomocí IDFT na komplexní časové vzorky. Dále je přidána cyklická předpona. Poté je na data aplikována funkce windowing, přidává se preamble a CES. Poslední blok provádí posunutí frekvenčního spektra.

8.3.4. Preamble

Slouží k synchronizaci a signalizaci příchodu rámců. Preamble je rozdělena na dvě sekce, z nichž se každá skládá z opakovaných symbolů, které jsou na všech subnosných SSC typu. Na každou ze sekcí preamble je aplikován mechanismus windowing. Druhá sekce preamble se skládá ze stejných symbolů akorát s opačnou fází. Druhá sekce je dlouhá pouze jeden symbol, kdežto délka první se odvíjí od cyklu AC sítě. Do symbolu jsou mapovány 2 bity. První symbol první sekce preamble je cyklicky rozšířen na počátku o dobu trvání $\beta/2$ symbolu S_1 . Stejný princip je uplatněn na konci první sekce a na tyto části je poté aplikována window funkce. Stejná pravidla platí pro druhou sekci preamble.



Obr. 79: Struktura preamble [9]

8.3.5. Odhad kanálových symbolů (CES)

CES je vysílán se schématem 2 bity na konstelaci na všech subnosných kromě MPSC a PSC. Modulační parametry jsou shodné s těmi pro záhlaví fyzické vrstvy. Bity, které obsahuje CES jsou generovány pomocí pseudonáhodné posloupnosti a obsahují stejné hodnoty jako preamble. Jinými slovy, první část obsahuje symbol S2 preamble a druhá část symbol S1 kde $S2 = -S1$.

Znak	Parametr	Hodnoty
N	Počet subnosných	$2k$; $k=7,8$
F_{SC}	Mezery mezi subnosnými [kHz]	$15,625/n$; $n=5,10$
N_{GI-PL}	Ochranný interval datové části [vzorky]	$(12/128)*N$; $(24/128)*N$
β	Délka okna [vzorky]	jakékoliv celé číslo mezi 0 až $N/16$
F_{US}	Posunutí frekvence [kHz]	$N/2 * F_{SC}$
BW	Šířka pásma [Hz]	$BW = N * F_{SC}$
NW	Celkové množství vzorků na OFDM symbol	$NW = N + N_{CP}$
N_{GI}	Ochranný interval	$N_{GI} = N_{CP} - \beta$
f_s	Kmitočet vysílání	$f_s = N * F_{SC}$
T_{OFDM}	Perioda symbolu [s]	$T_{OFDM} = (N + N_{CP} - \beta) / (N * F_{SC})$

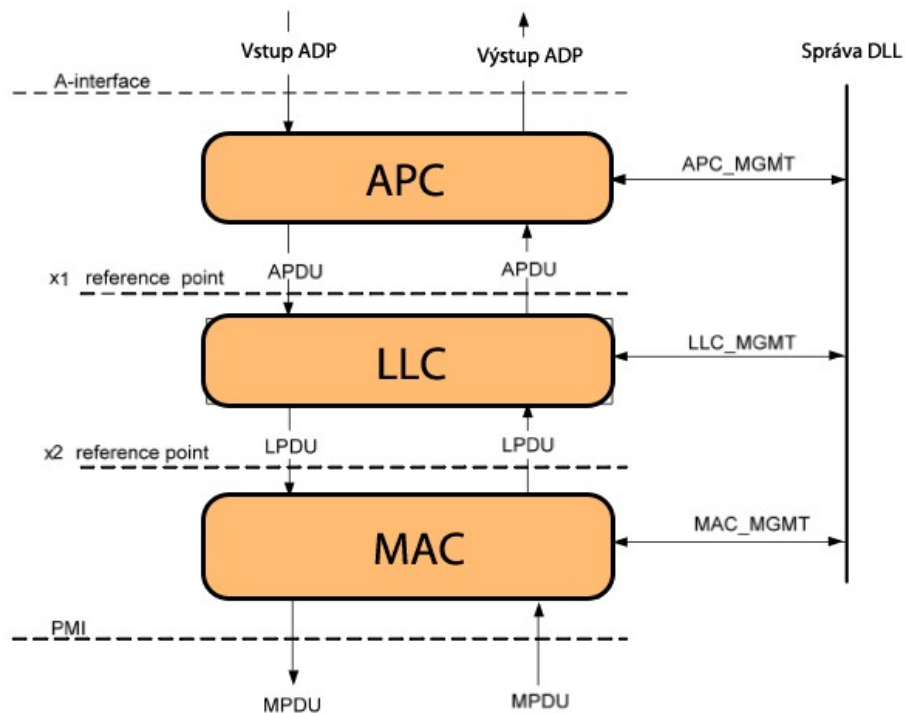
Tab. 13: Parametry OFDM modulace [9]

8.4. Spojová vrstva

Struktura spojové vrstvy je zobrazena na obr. 80. Spojová vrstva je rozdělena také na tři podvrstvy:

- **Application Protocol Convergence Sublayer (APC):** Podvrstva je zodpovědná za adaptaci bitového toku mezi aplikační entitou⁶ a přijímačem.
- **Logical Link Control Sublayer (LLC):** Řídí vysílání dat uzlu v rámci domény, vrstva je zodpovědná za navazování, udržování a ukončování spojení mezi uzly a dále se stará o QoS.
- **Medium Access Control Sublayer (MAC):** Podvrstva řídí přístup k mediu.

⁶ Aplikační entita (AE) je rozhraní mezi L3 vrstvou a L2 vrstvou pomocí níž dochází k výměně dat a signalizaci.



Obr. 80: Struktura spojové vrstvy [9]

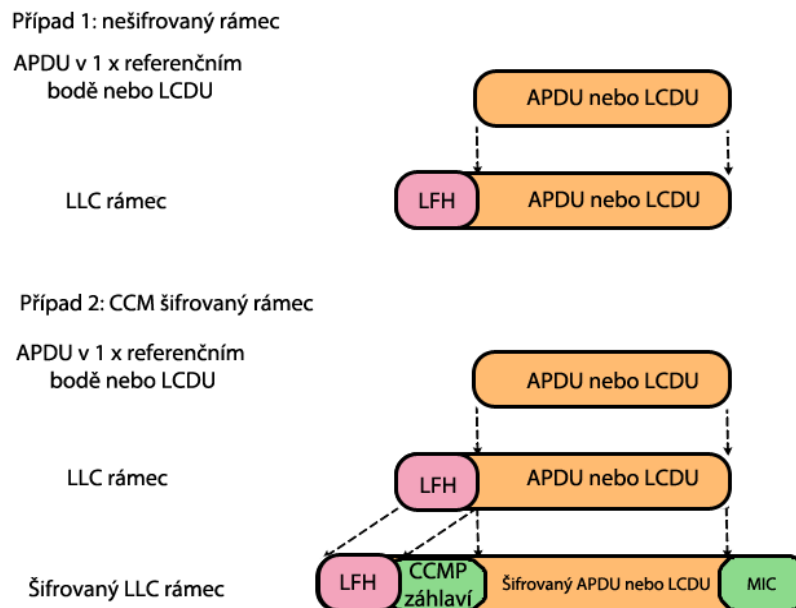
8.4.1. APC podvrstva

První podvrstvou ve směru sestupném je APC, která se stará o adaptaci bitového toku. Provádí se zde adresace a rozlišování QoS parametrů tím, že data s příslušnou prioritou jsou poslána do příslušné fronty. Nejprve je zde bitový tok transformován na APDU. Poté je APDU mapováno příslušné fronty v závislosti na cílové adrese, prioritě a kontrolních parametrech. V přijímacím směru je APDU rozdělen na příslušná protokolová aplikační data. Funkce pro adresaci přiřazuje cílovou adresu stanice příchozích dat aplikační vrstvy s fyzickou adresou uzlu, na který tato data mají být poslána.

8.4.2. LLC podvrstva

Na LLC vrstvě se řeší segmentace, šifrování a přeposílání dat. Ve směru vysílání je APDU přetransformován na rámec LLC pomocí rámce LCDU, který je generován vrstvou správy spojové vrstvy. Rámec poté vstupuje do bloku pro šifrování. LLC rámec je dále rozdělen na segmenty stejné délky. Každý segment je vybaven záhlavím s CRC polem. Segmenty jsou poté uloženy v ARQ zásobníku pro případ, že by vrstva LLC nedostala potvrzovací rámec po poslání dat. V přijímacím směru jsou vrstvou ověřeny všechny přijaté LPDU a posláno potvrzení. Dále jsou zahozeny poškozené rámce. Pokud je zapnuta funkce přeposílání, jsou rámce pomocí záhlaví poslány zpět na MAC podvrstvu a jsou provedeny příslušné kroky k přeposlání rámce na další uzel.

Struktura LLC rámce:



Obr. 81: Struktura LLC rámce [9]

Záhlaví LLC se skládá z následujících polí:

- **LLCFT (4b):** Typ LLC rámce. Existují tři typy rámce:
 - 0: Reserved
 - 1: Rámec pro správu
 - 2-15: Datový rámec – Ten se dále dělí na typy podle protokolu vyšší vrstvy (Ethernet, IPv6, IPv4 atd.).
- **CCMPI (1b):** Indikátor, že v rámci je přítomné záhlaví CCMP pro šifrovací účely.
- **MHI (1b):** Indikace záhlaví MESH.
- **Reserved ITU-T (2b):** Rezervováno pro budoucí použití.
- **MESH (?b):** MESH záhlaví.

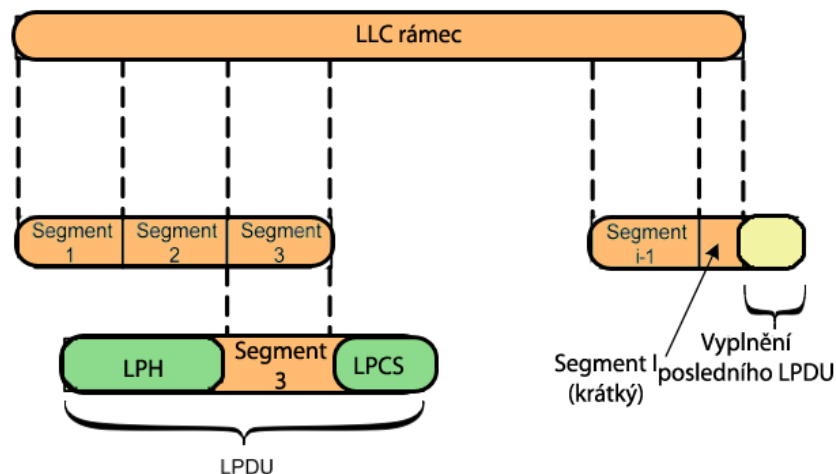
Pokud je povolena funkce šifrování, je k rámci přidáno záhlaví CCMP a pole pro kontrolu integrity zprávy MIC (*Message Integrity Check*). Záhlaví MESH podporuje přeposílání a rozšířenou adresaci a je v rámci přítomné v případě, že je zapnut rozšířený adresní režim, nebo je zapnuta funkce přeposílání. Délka pole je závislá na typu adresního režimu. Pro krátký adresní režim je pole dlouhé 16 bitů a v případě rozšířeného módu je pole dlouhé 64 bitů. Struktura MESH záhlaví je následující:

- **RELI (1b):** Indikace, zda je použito rozšířené záhlaví. Pokud je tato možnost aktivní, záhlaví obsahuje všechna pole kromě SR. Přítomnost SR pole indikuje SRI pole.
- **ADM (3b):** Indikace formátu SA a DA, zda se jedná o rozšířenou či krátkou adresaci.
- **LPRI (2b):** Priorita LLC rámce. První priorita je určena pro rámce, které není třeba přeposílat. Druhá úroveň priority je určena pro rámce, které jsou přeposílány a nesou data. Poslední nejvyšší priorita je určena pro rámce, které jsou určeny pro přeposílání a nesou kontrolní data.
- **SRI (1b):** Pole indikuje, zda je v záhlaví přítomné pole SR.

- **Reserved ITU-T (1b):** Rezervováno pro budoucí použití.
- **SA (16/64b):** Zdrojová adresa.
- **DA (16/64b):** Cílová adresa.
- **HopsLft (8b):** Maximální počet povolených skoků. Rámec je zahozen v případě, že pole je rovno nule. Pokud je v záhlaví přítomné pole SR, je tato hodnota nastavena na přesný počet skoků.
- **SN (8b):** Sekvenční číslo.
- **SR (16b):** Pole indikuje zdrojové směrování. Délka tohoto pole je proměnná a ukládají se zde krátké adresy uzlů, přes které daný rámec prošel.

Formát rámce APDU

Formát rámce je závislý na protokolu aplikační vrstvy. LLC rámec je rozdělen na segmenty, které jsou opatřeny záhlavím a zápatím jak ilustruje obr. 82.



Obr. 82: Generování LPDU z LLC rámce [9]

Poslední segment rámce může být kratší než ostatní segmenty, ale musí být vyplněn daty do příslušné velikosti. Maximální počet segmentů jednoho rámce může být pouze 64. LPCS zápatí je zde pro kontrolu integrity a jedná se o 32-bitový CRC. Záhlaví LPH obsahuje informace nutné pro znovu sestavení LLC rámce a umožňuje detekci poškozených rámců. LPH záhlaví se skládá z jednoho bajtu. Zde je 6 bitů určeno pro pole SSN, které slouží pro číslování segmentů. Druhé 2-bitové pole je rezervováno pro budoucí použití.

8.4.3. MAC podvrstva

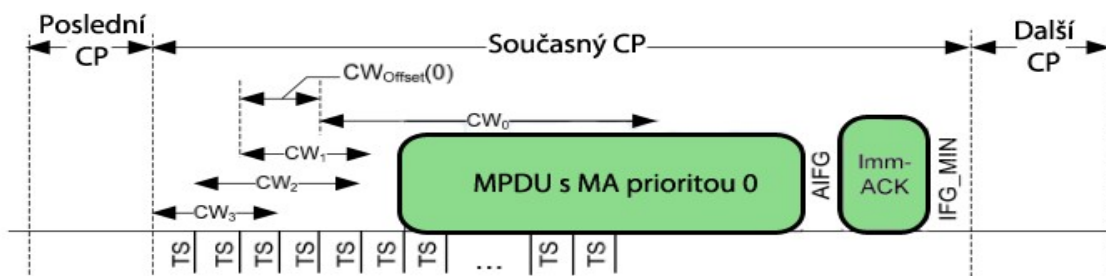
MAC vrstva řeší formátování dat do rámce spojivé vrstvy, plánování časů pro vysílání, podporu časování a přístup k médiu. Ve směru vysílání nejprve LPDU vstupuje do bloku MPDU assembler, kde se k datům přidá záhlaví MPH a v případě potřeby je rámec vyplněn na požadovanou velikost MPDU. Poté data vstupují do bloku plánování, kde se rámce řadí do jednotlivých front dle priority a jejich vysílání je naplánováno v závislosti na proceduře přístupu k médiu. Primitivní služby spojivé vrstvy obsahují signalizaci přítomnosti nosné CRS, která indikuje volné médium. Poté jsou data vyslána na fyzickou vrstvu. Sestavení MPDU rámce může být dvojího typu. První režim je SS-MPDU (*Single Segment MPDU mode*), kde se zpracovává pouze jeden LPDU rámec (segment LLC). Druhý režim je MS-MPDU (*Multi-Segment MPDU mode*), kde do jednoho MPDU rámce je vloženo několik

LPDU. Maximální počet segmentů z LLC vrstvy v jednom MPDU je 16. Struktura záhlaví MPH je následující:

- **MPDU type (3b):** Pole udává, zda se jedná o SS nebo MS MPDU.
- **ACK_TYPE (1b):** Pokud je požadováno potvrzení je hodnota v poli nastavená na log. 0.
- **NOS (6b):** Počet segmentů, ze kterých se skládá LLC rámec.
- **LSPL (6b):** Délka vyplnění posledního segmentu v bajtech.
- **LFSN (8b):** Sekvenční číslo LLC rámce.
- **SNID (16b):** 16-bitová adresa zdrojového uzlu.
- **DNID (16b):** 16-bitová cílová adresa uzlu.
- **SDID (16b):** 16-bitová doménová adresa zdrojového uzlu.
- **DDID (16b):** 16-bitová doménová adresa cílového uzlu.
- **NEST (8b):** Indikuje hodnotu parametru Nest(x) použitou pro vysílání.
- **LPDU-L (11b):** Délka LPDU rámce.
- **TP-REQ (2b):** Požadavek pro doporučení vysílacích parametrů.
- **PRIO (2b):** Priorita MPDU rámce.
- **Reserved (1b):** Rezervováno ITU-T.
- **Reserved (8b):** Rezervováno ITU-T.
- **MHCS (8b):** Cyklická redundantní kontrola CRC pro záhlaví.

Přístup na médium

Standardní uzel podporující technologii G.hnem podporuje také 4 úrovně priorit provozu. Dále existují zařízení s nízkou komplexitou, které podporují pouze 3 úrovně priority. Jak již bylo řečeno, priorita se určuje na úrovni APC podvrstvy. Priorita nejvyšší úrovně (4) je určena pouze pro pohotovostní data a asynchronní beacon zprávy. Na úrovni MAC podvrstvy se však také MPDU rámce řadí do front dle priority. Priorita MPDU je totožná s tou, jakou obsahují segmenty v MPDU. Přístup k médium je založený na prioritách a spojově orientovaném principu. Je definována doba CP (*Connect Period*). Interval CP končí po čase, co uzel dokončí vysílání sekvence rámců. Nový interval CP začíná ihned poté. Časový úsek CP se skládá ze 4 period, které jsou rozděleny podle priorit a mohou se překrývat. Taková perioda se nazývá CW (*Connection Window*) a obsahuje určitý počet časových slotů TS, jejichž počet se pro jednotlivé intervaly CW může lišit. CP interval začíná periodou CW s nejvyšší prioritou. Rámce určité priority mohou být vyslány pouze v intervalu CW shodné priority nebo nižší.

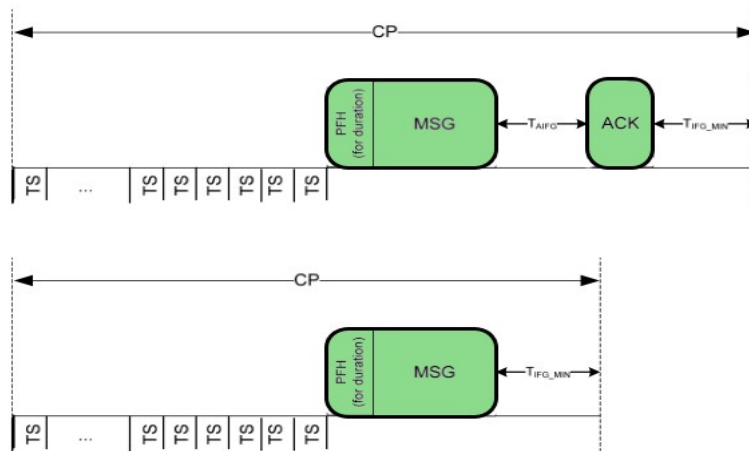


Obr. 83: Struktura CP intervalu [9]

Stanice využívají back-off proceduru v podobě čítače BC a velikosti okna posunutí

CW_{offset} , které udává, jaký počet TS musí proběhnout než může začít další CW okno. Čítač BC udává, kolik TS musí uzel čekat než začne vysílat. Stanice, které prošly selekcí priority pro dané okno, poté nastaví svůj čítač BC na náhodou hodnotu a ta stanice s nižší hodnotou BC začne vysílat. Stanice, sníží svoji hodnotu čítače po uplynutí každého TS, kde nedetekuje žádný signál (preambuli). Po odeslání dat stanicí je čítač BC vypnut, dokud nenastane další CP interval. Uzel čeká pro vyslání dat na další CP periodu v případě, že je detekována preambule v některém z TS. Konec aktuální CP periody je založen buď na době trvání zprávy, na přijetí potvrzení oznamující konec CP či na vypršení časovače.

Konec CP založen na době trvání zprávy funguje tak, že stanice po přijetí rámce počká určitý čas (2,1 ms) a poté je daný CP interval považován za ukončený. Délku zprávy stanice zjistí pomocí záhlaví fyzické vrstvy. Pokud je vyžadováno potvrzení ACK, tak až po přijetí potvrzení se čeká 2,1 ms a poté je CP považován za ukončený.



Obr. 84: Ukončení CP založené na době trvání zprávy [9]

Ukončení intervalu CP založené na přijetí potvrzení je zřejmé. Uzly, které nejsou připojeny nebo nevykonávají svůj back-off algoritmus, po přijetí Imm-ACK čekají 2,1 ms a poté dojde k uzavření aktuálního CP intervalu. Struktura ACK a jednotlivé typy jsou popsány v [9]. Pokud odpověď nepříjde do určitého časového rozmezí, uzel předpokládá kolizi a spustí svůj čekací časovač. Pokud není detekována žádná preambule do vypršení časovače, CP interval se po konci časovače ukončí. Poslední způsob ukončení CP založen na vypršení časovače je zřejmý.

8.4.4. Adresace

Pro účely adresace a identifikace uzlů v síti jsou definovány následující mechanismy:

- Každý uzel má továrně nastaven 64-bitový unikátní identifikátor EUI-64.
- Po registraci do příslušné domény má každý uzel krátkou adresu, které obsahuje:
 - 16-bitový doménový identifikátor, který je jedinečným identifikátorem domény, ke které se uzel připojuje. Může být přiřazen manuálně či automaticky.
 - 16-bitový identifikátor uzlu, který je jedinečným uvnitř domény. Je přiřazován při registračním procesu a po odhlášení zařízení z domény může být toto ID použito u jiného zařízení.

Je možné provozovat dva režimy adresace, kde jeden je krátký adresační režim a druhý je rozšířený. Režim určuje, jaká identifikační metoda se bude používat při komunikaci.

Pro rozšířený režim se využívá adresy EUI-64 a měl by být použit pouze v případě, že není možné v dané síti provozovat možnost krátké adresace. Pro krátký mód se využívají identifikátory domény a uzlu. Adresy 0xFFFFE a 0xFFFF jsou určeny pro identifikaci zdrojového uzlu, který ještě nemá platný identifikátor uzlu.

	Parametr	Hodnoty	Popis
Identifikátory uzlu	Rezervováno	0xA000-0xFFFFD	
	ID uzlu	0x0000-0x7FFF	ID přiděleno při registraci, určeno pro komunikaci s ostatními prvky sítě
	Broadcast ID	0xFFFF	Broadcast ID pro cílové uzly v dané doméně
	Multicast ID	0x8000-0x9000	
Identifikátory domény	ID domény	0x0000-0xFFFF	ID přiřazeno manuálně nebo autokonfigurací
	Broadcast ID	0xFFFF	Broadcast do všech domén

Tab. 14: Rozsahy adres uzlu pro režim krátké adresace [9]

8.4.5. Průběh komunikace mezi uzly

Komunikace může probíhat v rámci jedné nebo více domén. Unicast komunikace v rámci jedné domény v případě krátké adresy závisí na hodnotách polí v MPH záhlaví - viz struktura MPH záhlaví. V případě rozšířené adresace je MPH rozšířena o MESH pole. Broadcast vysílání v rámci domény je povoleno jenom pro SS-MPDU a není třeba, aby ostatní stanice posílaly potvrzení.

Komunikace s přeposíláním je možná pomocí L2 nebo L3 směrování. DM stanice informuje, v jakém režimu (L2/L3) se posílají data do jiných domén. Pokud je L2 přeposílání vypnuté, stanice nepřeposílají žádná data kromě beacon rámců. Pro uzly je L2 přeposílání dobrovolné a tuto schopnost indikují DM stanice při registraci. DM uzel v případě, že stanice podporuje L2 přeposílání určuje, jaké uzly tuto funkci budou plnit. Stanice, které mají schopnost přeposílání, ale nejsou určeny jako doménové přeposílající uzly, musejí zahodit rámec určený k přeposílání. Pro účely L2 směrování se využívá MESH záhlaví. Při přeposílání dat si stanice udržují své směrovací databáze.

8.4.6. Beacon zprávy

Obdobně jako u předchozích technologií i zde jsou beacon zprávy použity pro správu domény a rozesílá je DM. V doméně lze provozovat 3 typy rozesílání beacon rámců:

- Synchronní režim
- Asynchronní režim
- Režim bez použití beacon zpráv: Nejsou posílány žádné zprávy beacon a veškeré kontrolní informace jsou posílány pomocí rámců správy.

Stanice DM může kdykoliv změnit režim rozesílání beacon v síti. Režim je signalizován v každém rámci beacon. Každý beacon rámec obsahuje také sériové číslo, které se zvyšuje s každým novým rámcem. Pro odesílání těchto zpráv se využívá robustní mód. Beacons může posílat pouze DM stanice a pro dosažení skrytých uzlů využívá BPR (*Beacon Proxy*) stanice.

Synchronní režim

V tomto režimu je jeden pevný časový interval vymezen pro vysílání beacon zpráv.

Struktura beacon cyklu je znázorněna na obr. 85.



Obr. 85: Struktura CP intervalu [9]

Z obrázku je zřejmé, že časový interval začíná jedním slotem pro beacon zprávu a potom několika sloty pro přeposlání těchto zpráv (R-beacon). Poté následuje CP interval. DM může poslat zprávu beacon pouze v prvním slotu. Počet slotů pro R-beacon může být maximálně 8. Pokud je potřeba většího množství těchto slotů, DM může přiřadit všechny sloty v jednom beacon cyklu postupně každému BPR. Je však nutné zajistit, aby zprávy byly pomocí BPR rozeslány za určitý čas. Koncové uzly nemohou vysílat v době, která je vymezena pro beacons.

Asynchronní režim

Při tomto režimu nejsou definovány žádné hranice, kdy může být zpráva odeslána. R-beacons jsou také vysílány kdykoliv pomocí BPR. Zprávy jsou posílány s prioritou 3 a měly by být poslány alespoň jednou za určitý časový úsek.

8.4.7. Formát beacon zprávy

Rámec beacon obsahuje jednu nebo více zpráv určených pro správu. V beacon rámci může být pouze určitý typ správních údajů (typ zprávy: 001). V synchronním režimu beacon zpráva obsahuje informace pro synchronizaci beacon zpráv. Parametry záhlaví rámců musejí být nastaveny na příslušné hodnoty, aby se jednalo o beacon zprávu. Záhlaví LLC rámce, který nese LCDU kontrolní zprávy, má následující strukturu:

- LLCF=1
- MHI=1
- CCMPI=0

Záhlaví MESH musí obsahovat následující hodnoty:

- RELI=1
- ADM=00
- LPRI=3
- SRI=0
- SA= ID DM uzlu
- DA=0xFFFF

Záhlaví MPDU obsahuje následující parametry:

- MPDU_TYPE=000
- ACK_TYPE=0
- SNID= ID DM uzlu nebo BPR uzlu

- DNID=0xFFFF
- SDID=DDID= ID domény

Parametry pro přenos jsou:

- Kódový poměr: ½
- Počet opakování: 4, 6 nebo 12
- Použití robustní modulace pro preambuli a záhlaví

8.4.8. Správní rovina

Existují dva typy komunikace pro správu u G.hnem, a to interní a externí (in-band). Interní zprávy jsou zapouzdřeny v LCDU a dochází tak k výměně informací mezi správními entitami. Externí zprávy jsou přenášeny v APDU. Oba dva typy zpráv mají stejný formát. Jeden rámec může obsahovat několik zřetězených kontrolních zpráv. Po zprávách následuje 32-bitové pole FCS. Každá zpráva obsahuje záhlaví MMH (*Management Message Header*). Záhlaví obsahuje informace o typu a délce zprávy, dále sekvenční číslo a parametry spojené se segmentací. Typ zprávy je definován pomocí OPCODE, který je spjatý s příslušnou funkcí zprávy. Maximální velikost LCDU je 992 bajtů. Typy kontrolních zpráv jsou:

- Informace o doméně
- Synchronizační beacon
- Požadavek pro parametry přenosu
- Doporučení pro parametry přenosu
- Požadavek na beacon informace

Podrobný popis struktury záhlaví a jednotlivých typů kontrolních zpráv je možné nalézt v [9].

8.4.9. Nastavení domény

Doména je platná pouze tehdy, pokud některý z uzlů operuje v režimu DM s příslušným identifikátorem domény. Pouze jeden uzel může být DM. V síti, kde několik uzlů může fungovat jako DM, je implementován DMS (*Domain Master Selection*) protokol pro výběr DM. Identifikátor domény je generován automaticky, nebo nastaven pomocí správce. Identifikátor je poté obsažen v beacon zprávách. Parametry přenosu, které mohou být vyjednány, mezi uzly jsou:

- Tonová maska
- Modulace
- Počet opakování
- Režim prokladače
- Kódový poměr konvolučního kodéru
- Délka kódového slova RS

8.5. Zabezpečení

Šifrovací mechanismus je založen na AES-128 a CCM (*Cipher block Chaining Message*). Ověření uzlu, generování a distribuce šifrovacích klíčů a jejich aktualizace se provádějí pomocí kontrolní procedury AKM (*Authentication and Key Management*). Tyto procedury mohou nastavit jak skupinový klíč, tak párové klíče. Skupinové klíče jsou unikátní a užívají se pro skupinu uzlů. Zašifrované LLC rámce se posílají pomocí CCM protokolu,

který vkládá k datům CCMP záhlaví a kód pro integritu MIC. Mechanismus umožňuje pravidelné změny klíčů všech uzlů v doméně. Nastavení bezpečnostních mechanismů lze v dané doméně měnit. Důvěryhodnost dat je otázkou řešení na vyšších vrstvách. Detailní popis CCM algoritmu a strukturu CCMP záhlaví lze nalézt v [9].

9. IEEE 1901.2

Standard je vyvinutý pracovní skupinou IEEE P1901.2 a velmi se podobá doporučení G3-PLC. Počátek vývoje začal v roce 2010 a je podporovaný skupinou IEEE Communications Society. Doporučení se zabývá fyzickou a spojovou vrstvou. Není zde zaveden bootstrapping, ověřování a směrování jako u G3. Doporučení podporuje koexistenci, dovoluje nekompatibilním zařízením spolehlivě fungovat a sdílet stejné frekvenční spektrum. Podporovaná pásma jsou CENELEC A/B, ARIB a FCC-above-CENELEC. Toto FCC pásmo začíná od frekvence 145,3 kHz. Maximální možná velikost rámce je zde 1280 bajtů. Další odlišnosti od G3 jsou:

- Podpora robustního režimu: Robustnost je v tomto případě dosažena pomocí DBPSK modulace a opakovacího bloku RC stejně tak jako u G3. Rozdíl je zde v tom, že pro data lze použít RC-6, což znamená, že i datové bity lze opakovat šestkrát. U G3 toto bylo možné pouze pro záhlaví FCH a pro data bylo možné použít pouze RC-4.
- Není zde implementován mechanismus SSCA (*Subsequent Segment Collision Avoidance*) jak u G3.
- Není specifikována adaptační vrstva s protokolem 6LoW-PAN.
- Maximální přenosová rychlost 46 kb/s

Dalším zásadním rozdílem mezi jednotlivými standardy je způsob směrování. G3 pro směrování využívá LOADng protokol a PRIME a G.hnem implementovaly svůj vlastní mechanismus, který je však závislý na neustálé komunikaci mezi hlavní a podřízenou stanicí. V tomto směru je G3 efektivnější, protože jakmile je síť stabilní, dochází k výměně zpráv pouze při změně stavu cestu. IEEE 1901.2 nedefinuje žádný směrovací protokol a implementace příslušného směrovacího protokolu je v kompetenci správce systému. Nicméně systém výběru vhodné cesty je ze své podstaty založen na parametrech fyzické vrstvy. Přenos těchto parametrů pro vyšší vrstvy je definován pomocí zpráv IE (Information Elements), což jsou bloky dat, které leží v záhlaví MAC.

Fyzická vrstva obsahuje stejné funkční bloky jako G3. Obsahuje tedy OFDM modulátor, dále konvoluční a Reed Solomon kódér a opakovací bloky. Scrambler a dvoudimenzionální prokladač jsou naprosto stejné jako u G3. Obdobně jako u G3 je zde mechanismus maskování nosných, které nejsou vlivem šumu vhodné pro přenos dat. Další mechanismus pro zvýšení spolehlivosti je možnost nastavení robustnosti. Je podporována výměna tónové masky mezi uzly. Modulace používané v tomto doporučení jsou:

- Diferenciální varianta: DBPSK, DQPSK a D8PSK
- Koherentní varianta: BPSK, QPSK, 8PSK a 16-QAM

Na fyzické úrovni jsou podporovány dva druhy rámce, kde jeden je určen pro data a druhý je potvrzovací ACK/NACK. Je zřejmé, že každý rámeček ze synchronizačních účelů obsahuje preamble. Struktura FCH záhlaví obsahuje všechna potřebná data pro přenos a je zabezpečena CRC kódem, jehož délka je závislá na použitém frekvenčním pásmu.

Spojová vrstva je založena na standardu 802.15.4 a skládá se z adaptační ADP podvrstvy a MAC podvrstvy. Přístup k médiu je zajištěn pomocí mechanismu CSMA/CA. Přístup k médiu je dvojího typu, přičemž jeden je určen pro režim Non-beacon PAN a druhý pro beacon-enabled PAN. Je zde zabudována podpora QoS. Spojová vrstva tradičně řeší fragmentaci, potvrzování a šifrování. MAC rámec používá adresu s délkou 16 nebo 64 bitů. Jsou využity dva režimy zasílání informací pro správu:

- Non-beacon PAN: Zařízení neposílá žádnou signalizaci v podobě beacon rámců. Vše se provádí pomocí CSMA/CA a není poskytována garance doručení datových rámců.
- Beacon-enabled PAN: PAN koordinátor generuje signalizační rámce beacon.

Každé zařízení si udržuje databázi sousedů. Nový záznam v tabulce je přidán po přijetí rámce od jiné stanice. V tabulce jsou obsaženy parametry pro vysílání, jako je zisk, typ modulace a tónová maska. Koexistence s jinými technologiemi je mimo jiné docílena pomocí maskování frekvencí.

10. Praktická část

Cílem praktické části bylo ověření vlastností PLC modemu pro standardy PRIME a G3-PLC. Vyhodnotit chybovost v závislosti na použitém modulačním schématu, porovnat jednotlivá modulační schémata a zhodnotit klady a zápory obou technologií a určit mezní parametry provozu. Zároveň bylo provedeno srovnání, zda naměřené hodnoty odpovídají teoretickým předpokladům.

Měření probíhalo v několika fázích. V první fázi byl měřen standard G3-PLC při jednoduchém zapojení modemů, mezi které byl vložen útlumový článek a generátor šumu. V druhé fázi měření G3 byla sestavena trasa o délce 6,9 km, do které byl opět zapojen útlumový článek a generátor šumu. Poté byla trasa doplněna o dvě odbočky, které dle předpokladů mohou zhoršit vlastnosti přenosu. Jako doplňující měření bylo dále proměřeno CENELEC pásmo B a B+C pásmo. Třetí fáze měření G3 spočívala v umístění útlumového článku s generátorem šumu za trasu a byly zkoumány různé typy šumu a jejich vliv na chybovost. Z teoretických předpokladů vyplývá, že CENELEC pásmo by mělo mít lepší vlastnosti pro přenos, z důvodu nižších frekvencí. Měření se provádělo na sdělovacím vedení typu SYKFY a UTP.

Použité přístroje

Pro měření a ověření vlastností byly použity dva modemy (vývojové kity) od firmy Texas Instruments C2000 TMDSPCKIT-V3. Vlastní zařízení se skládá z karty F28069 a analogového front end modulu AFE031. Modemy podporují standardy PRIME a G3-PLC pouze pásmech CENELEC A,B,C,D. Příslušný standard lze do zařízení nahrát v podobě firmware pomocí emulátoru USB JTAG. Velikost kódu je omezena na 32 kB. Společně s modemem je také možné do počítače nainstalovat program Zero Configuration GUI (ZCG). Tato aplikace umožňuje ovládat a testovat funkce PLC modemu. Technickou dokumentaci k jednotlivým modulům modemu je možné nalézt v příloze na CD. Pro použití modemu v FCC pásmu je nutné nahradit front end modul AFE031 a kartu F28069 za vykonnější typ.



Obr. 86: Modem Texas Instruments TMDSPCKIT-V3

Ostatní přístroje použité pro měření:

Přístroj	Typ
Útlumový článek	Tesla
2 x PLC modem	Texas Instruments TMDSPCKIT-V3
Generátor	Agilent 33220A
Generátor	Agilent 33250A
Vektorový síťový analyzátor	Rhode & Schwarz

Tab. 15: Použité přístroje pro měření

S vývojovým kitem TMDSPCKIT-V3 se pojily určité problémy. Prvním problémem byl fakt, že modemy měly obsahovat v paměti software s PRIME standardem. Při zapnutí však nebyl žádný firmware v paměti lokalizován a tak bylo nejprve nutné jej nahrát do paměti. To se provádí pomocí programu C2Prog. Návod, jak tento software použít pro nahrání příslušného standardu je popsán v [10]. Software pro G3 standard bylo možné bez problémů nahrát na paměť zařízení. Bohužel software pro standard PRIME sice bylo možné úspěšně nahrát na paměť modemů, ale poté nebylo možné s modemy navázat komunikaci přes USB. Proto, aby bylo možné na modemech provozovat PRIME byl vznesen dotaz na technickou podporu firmy Texas Instruments, kde podpora nebyla schopna problém vyřešit. Dále byly testovány různé verze software PRIME v kombinaci s verzemi Zero Configuration GUI, což však nepřineslo žádný pozitivní výsledek. Posledním pokusem, jak navázat komunikaci s modemem bylo sériové rozhraní. Komunikaci s počítačem a modemem přes sériové rozhraní nebylo možné ověřit z důvodu nekompatibilního ovladače pro USB konvertor sériového rozhraní typu UC-232A pro operační systém Windows 8. Z těchto důvodů praktická část obsahuje pouze sérii měření pro standard G3. Série měření pro standard G3 byla proto rozšířena o různé typy rušení na vedení, kde toto měření zastoupilo původně plánované měření pro standard PRIME.

10.1. Aplikace Zero Configuration GUI

Zařízení komunikuje s počítačem, a tedy i příslušnou aplikací pomocí USB. Na jeden počítač lze připojit více PLC modemů a jejich rozlišení je možné provést na základě připojeného USB. V mém případě se jednalo o USB porty COM8 a COM6.

Software je určený pro testování a ovládání funkcí modemu. Program je možné spustit ve dvou režimech. Prvním režimem je Zero Configuration mód, který umožňuje základní nastavení modemu, přenos souborů a zpráv, provedení testu na fyzické vrstvě a zobrazuje základní informace o přenosu. Druhým režimem je Intermediate, který umožňuje nastavovat pokročilejší funkce a zobrazuje více informací o přenosu a spojení. V tomto režimu lze také nahrávat firmware do zařízení, anebo provádět jeho zálohu. Také je zde možný přenos zpráv a souborů. Měření bylo prováděno na verzi ZCG 2.104 a G3 verze 7.6.1.10.

Zero Configuration mód

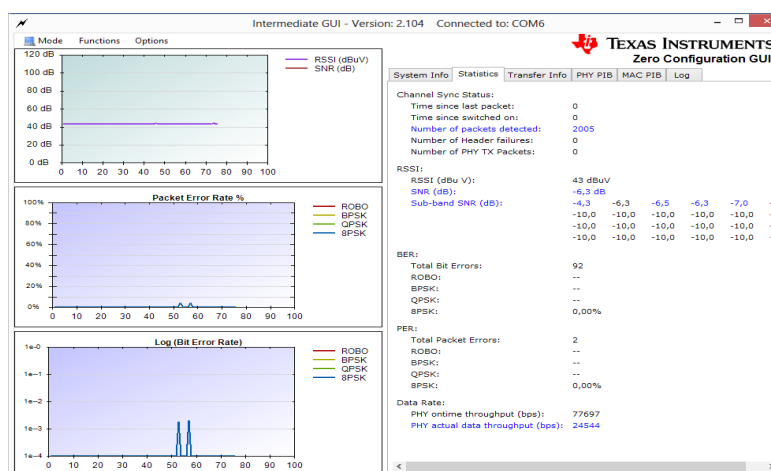
Po spuštění aplikace se zobrazí základní rozhraní, kde je možné posílat zprávy a přenášet soubory. USB port, ke kterému je zařízení připojeno, je vypsán v úvodní liště. Přepnutí do Intermediate režimu je možné pomocí rozbalovacího menu s názvem MODE.

Základní režim obsahuje pět záložek, z nichž se ta první nazývá „System info“. Zde jsou zobrazeny základní informace o zařízení, jako například verze HW a firmware, typ zařízení (G3, PRIME), režim činnosti zařízení, diagnostický a datový port, použití koherentní

modulace, adresa a jiné. SCI B u datového portu znamená, že pro komunikaci s modemem je využit USB port. Pro komunikaci lze také využít klasické sériové rozhraní UART, který je označen jako SCI-A. Pro změnu portu je nutné upravit konfigurační soubor *PLC_Application_Suite.exe.config*. V záložce „PHY Parameters“ je možné nastavit modulační schéma a zároveň zobrazuje parametry fyzické vrstvy pro přijímač a vysílač. Záložka „PHY test“ umožňuje testování spojení na fyzické vrstvě. Pro spuštění testování je zapotřebí propojit dva PLC modemy, kde jeden modem funguje jako vysílač a vysílá testovací data a druhý je v režimu přijímače. Zároveň jsou zde zobrazeny informace o průměrné hodnotě kvality signálu, SNR (*Signal to Noise Ratio*), počet chybných paketů vztažených k celkovému počtu paketů, počet správně přijatých bitů, BER (*Bit Error Rate*) a další údaje.

Záložka „Statistics“ poskytuje stejné údaje jako předchozí panel s rozdílem, že tyto informace jsou určeny pro přenos souborů a textových zpráv. Zobrazuje počet odeslaných nebo přijatých paketů a bajtů z přenášeného souboru. Poslední záložkou je „Log“, který udává informace o systému, přenosu informací a použitém standardu. Obsah informací je možné měnit pravým tlačítkem myši a kliknutím na pole logu. Je možné zobrazit následující informace:

- **Enable Message Data Display:** Zobrazuje přenos a obsah zpráv přijatých či odeslaných v závislosti na dalších zvolených možnostech.
- **Enable Logging to a File:** Tato volba umožňuje přímo ukládat informace z logu do souboru.
- **Log Full Message Data:** Zobrazuje formátovaný obsah dat ve zprávách. Při tomto režimu je nutné mít povolenou možnost Enable Message Data Display.
- **Log Condensed Data:** Zobrazuje pouze typ zprávy.
- **Log Raw Message Data:** Tato volba zobrazuje neformátovaná data zprávy jako bajtový tok.
- **Clear Display:** Vymaže informace v Log okně. Neovlivňuje data ukládaná do souboru.
- **Save to File:** Uloží aktuální obsah Log okna do souboru dle volby.



Obr. 87: Ukázka výstupu GUI

Intermediate mód

Tento režim umožňuje nastavovat velké množství parametrů. Na úvodním rozhraní jsou zobrazeny tři grafy:

- Závislost kvality signálu RSSI a SNR na čase měření
- Závislost chybovosti BER na čase měření
- Závislost PER chybně přijatých paketů na celkovém počtu přijatých paketů

Hlavní záložky obsahují víceméně stejné informace jako základní režim pouze s rozdílem, že jsou zde podrobnější informace. Záložka „*Transfer info*“ zobrazuje opět informace o přenosu souborů a textových zpráv. V Menu pod položkou „*Options*“ lze nastavit parametry systému (*Set System Config*). Je možné volit následující parametry:

- **Device Mode:** Nastavení režimu zařízení, které může fungovat jako Point-to-Point, eMeter a další. Pro testování modemů je nutné využít režim Point-to-Point.
- **Port:** Jaký port je nutné použít pro komunikaci se zařízením. V mém případě jsem volil SCI-B (USB port).
- **Address:** Možnost nastavení rozšířené adresy zařízení.
- **PHY Parameters:** Zde se nachází nastavení modulačního schématu (normální/koharentní) a možnost, zda se bude posílat požadavek na tónovou masku TMR (*Tone Map Request*).

Další důležité parametry pro nastavení zařízení se nachází pod záložkou „*PHY parameters*“ v menu „*Options*“. Zde je možné nastavovat hodnoty a parametry fyzické vrstvy. Mezi parametry patří:

- Modulace
- Požadavek na tónovou masku TMR
- Pásmo
- Masky
- Použití koherentních modulací

V části „*PHY Transmit Test*“ je možné nastavit zařízení do testovacího režimu, kde zařízení má roli vysílače. Je zde možné nastavovat délky PDU typ datové posloupnosti a jiné parametry. V poslední části je možné nastavit zařízení do testovacího režimu s rolí přijímače. V menu „*Options*“ je dále možné nastavovat parametry spojivé vrstvy.

V Menu „*Functions*“ lze nastavit zařízení do role základního nebo podřízeného uzlu nebo spustit funkci „*Monitor Message Function*“, kde je možné filtrovat typ zpráv, které zařízení přijímá či odesílá. Podrobnější popis jednotlivých funkcí aplikace lze nalézt v [10].

10.2. První fáze měření G3

Zapojení pracoviště a postup měření

Pracoviště se skládalo ze dvou PLC modemů C2000, útlumového článku, transformátoru a generátoru. Propojení prvků je znázorněno na obr. 88 a 89. Jeden z modemů byl nastaven do režimu vysílače a druhý do režimu přijímače. Mezi modemy byl vložen generátor šumu a útlumový článek. Cílem měření bylo ověřit, na jakých hodnotách útlumu začnou jednotlivá použitá modulační schémata vykazovat chybovost a jaké hodnoty útlumu

jsou mezním limitem pro komunikaci. Nejprve bylo nutné určit, jak velká hodnota šumu se musí nastavit na generátoru. Pro domácí prostředí se šum v síti pohybuje kolem hodnoty -120 dBm/Hz a pro průmyslové prostředí je hodnota stanovena na -96 dBm/Hz. Protože je mezi generátorem a útlumovým článkem transformátor, je nutné provést přepočítání napětí. Získané napětí poté sloužilo k tomu, aby bylo možné určit, jak velkou amplitudu šumu je nutné na generátoru nastavit. Pro výpočet byl použit následující vzorec:

$$MDS = 10 \log \left(\frac{k \times T_0}{10^{-3}} \right) + NF + 10 \log(BW) + SNR \quad (8)$$

Kde MDS značí úroveň šumu nebo hodnotu minimální detekovatelné úrovně signálu. T_0 značí teplotu v kelvinech a „ k “ je Boltzmanova konstanta. Dalším členem v rovnici je šumové číslo NF (*Noise Figure*), který udává degradaci SNR vlivem ostatních komponent v radio-frekvenčním řetězci. Výsledná hodnota těchto dvou členů je dána v jednotkách dBm/Hz, to znamená, že daná hodnota v pásmu širokém 1 Hz má určitou hodnotu výkonu šumu. Pro měření byla zvolena šířka pásma 10 MHz a úroveň šumu v průmyslovém prostředí v šířce pásma 1 Hz je oněch -96 dBm/Hz. Pro pásmo 10 MHz je tedy úroveň šumu dána:

$$MDS = -96 \text{ dBm/Hz} + 10 \log(10 \times 10^6) = -96 \text{ dBm/Hz} + 70 \text{ dB} = -26 \text{ dBm} \quad (9)$$

Nyní zbývá určit hodnotu SNR, která udává, o kolik je třeba zvýšit amplitudu šumu nastavovaného na generátoru. Byl použit transformátor s následujícími parametry:

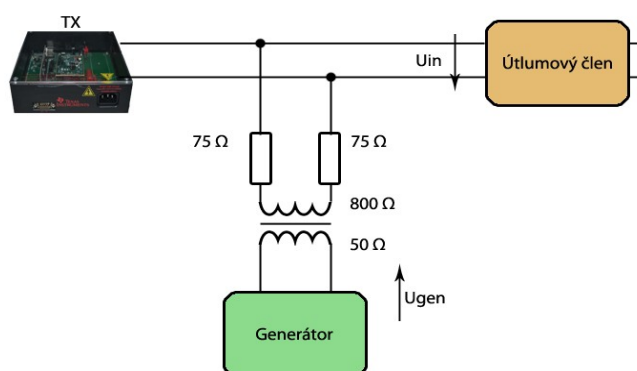
Typ	North Hills Wideband XFMR 0801BB
Odpor primárního vynutí	800Ω
Odpor sekundárního vynutí	50Ω
Frekvenční rozsah	10 kHz – 25MHz

Tab. 16: Parametry transformačního členu

Převod transformátoru je dán:

$$p^2 = \frac{R_{prim}}{R_{sek}} = \sqrt{\left(\frac{800}{50}\right)} = \frac{4}{1} \quad (10)$$

Převod napětí udává, o kolik je napětí na primárním vynutí větší než na sekundárním a v tomto případě je napětí 4x větší. Schéma zapojení transformátoru je na následujícím obrázku.



Obr. 88: Schéma zapojení transformačního členu

Zapojení lze transformovat na tvar zapojení děliče napětí. Z děliče napětí, pokud uvažujeme vstupní odpor modemu 100 a útlumového článku 100 ohmů paralelně (ve výsledku 50 ohmů) vychází rovnice:

$$U_{gen} = U_{in} \times \frac{50}{950 + 50} \quad (11)$$

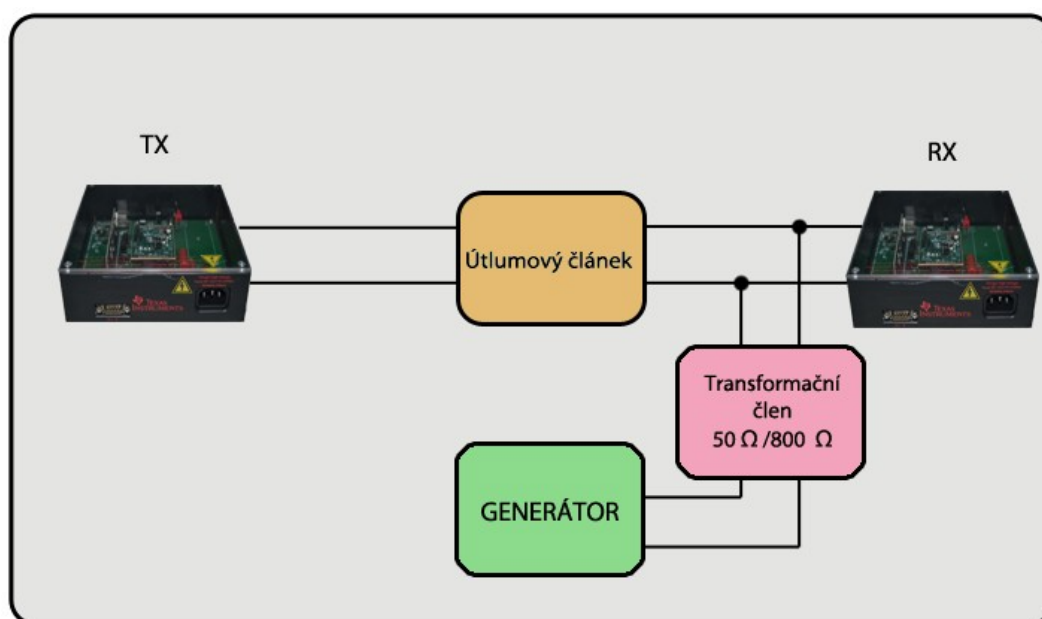
což lze upravit do tvaru:

$$\frac{U_{gen}}{U_{in}} = \frac{50}{1000} = \frac{1}{20} \quad (12)$$

Výsledek udává, že napětí na primárním vnutí je dvacetkrát větší než na sekundárním. Pro získání hodnoty napětí na sekundárním vnutí je třeba vydělit napětí na primárním vnutí hodnotou převodu. Výsledná hodnota je tedy 5. Po převedení této hodnoty do dB je výsledek roven 14 dB, což je hodnota SNR, kterou je nutné dosadit do vzorce (8). Z výpočtu vychází hodnota -12 dBm. Generovaný šum je typu AWGN (*Additive White Gaussian Noise*). Při měření byly vždy nastaveny oba modemy a spuštěno generování provozu.

Dále bylo nutné nastavit parametry fyzické vrstvy na obou modemech. Na obou zařízeních bylo zvoleno pásmo CENELEC s tónovou maskou CENELEC A 36. Byla zvolena možnost TMR (*Tone Mape Request*) a automatická kontrola zisku AGC (*Auto Gain Control*). Pro vysílač bylo zaškrtnuto pole „*Enable TX Test Mode*“. Délka PPDU byla nastavena na hodnotu 100 bajtů a posloupnost dat v datové části na možnost „*Static*“. V poslední řadě bylo zaškrtnuto pole „*Continuous*“, které umožňuje nepřetržité vysílání dat. U přijímače je pouze nutné povolit RX Test Mode a zvolit možnost „*Static*“ pro datovou posloupnost a nastavit stejný typ modulace s podporou TMR ve stejném pásmu.

Při měření byly postupně měněny modulační schémata a útlum při konstantní hodnotě šumu. Doba měření se u každé modulace odvíjela od detekovaného počtu paketů. Při dosažení přibližné hodnoty 2000 detekovaných paketů bylo měření pro danou modulaci ukončeno. Měření bylo prováděno v rozsahu hodnot 44-60 dB. Nejprve byla nalezena hodnota, při které začal systém s danou modulací chybovat, a poté byly proměřeny hodnoty v blízkosti této úrovně. Vyšší hodnoty útlumu, kde již systém vykazoval vysokou chybovost, byly proměřeny s hrubším rozestupem nastavovaného útlumu.



Obr. 89: Zapojení pracoviště (první fáze měření)

Zhodnocení výsledků

Měřit mělo smysl pouze se zapnutým šumem. Samotný útlumový článek bez šumu neměl na chybovost komunikace žádný vliv. Tento fakt je zapříčiněn nedostatečným stíněním zařízení a parazitním šířením signálu po napájení modemů a přes USB konfigurační rozhraní.

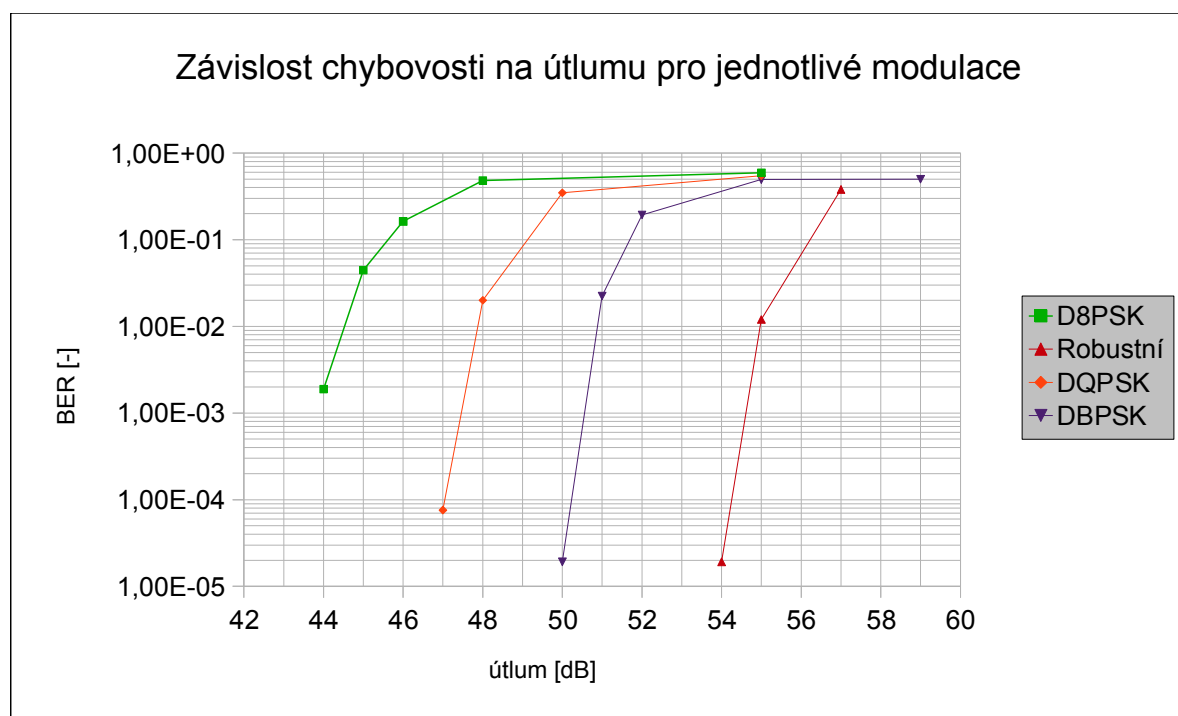
Ke ztrátě synchronizace u všech typů modulací docházelo při útlumu 60 dB. Skutečnost, že dochází ke ztrátě synchronizace u všech modulací při stejné hodnotě útlumu je dána způsobem modulace preamble a záhlaví fyzické vrstvy. Na tyto části rámce je aplikována robustní modulace. Měření dopadlo podle očekávání. Modulace D8PSK je nejméně odolná při zvyšujícím se útlumu. Odolnost ostatních modulací roste v závislosti na počtu mapovaných symbolů do příslušné modulace. Jak vyplývá z měření, robustnější modulační schéma je odolnější zhruba o 3 dB útlumu, než se začnou projevovat chyby. Nejdolnější modulací je robustní modulační schéma, které využívá modulaci DBPSK se zapnutým opakovacím blokem RC-4 (Pozn.: RC-6 je možné použít pouze pro FCH záhlaví). Je zřejmé, že pro každý typ modulace byla naměřena odlišná přenosová rychlost, která klesá s robustností modulace. Rychlost přenosu dat je teoreticky pro standard G3 $v_p=46$ kb/s pro modulaci D8PSK. Dosažené rychlosti přenosu při měření jsou však nižší. Nejvyšší rychlost byla dosažena pro D8PSK modulaci s hodnotou 23,6 kb/s. Při vysoké chybovosti docházelo k tomu, že systém vyhodnotil rychlost jako nulovou. To je zapříčiněno neschopností systému vyhodnotit přenosovou rychlost při vysokých hodnotách chybovosti. Vypovídající hodnotu výsledků to však nemění, protože trasa, na které je chybovost $5,92E-01$, je zcela nevyhovující pro přenos dat. Při měření byla aktivní možnost TMR. Experimentálně bylo vyzkoušeno, zda má tato funkce vliv na přenos. Z měření vyplývalo, že TMR nemá vliv na přenos při tomto zapojení.

Typ modulace	útlum [dB]	celkový počet detekovaných paketů	BER [-]	BER [%]	celkový počet chybných bitů [-]	PER [%]	celkový počet chybných paketů [-]	Přenosová rychlost [kb/s]	Počet chyb v záhlaví [-]	SNR [dB]	RSSI [dBuV]
D8PSK	44	2038	1,89E-03	0,19	3081	4,71	96	23,6	0	-7,5	68
	45	2204	4,45E-02	4,45	78462	69,83	1539	8,5	0	-7,8	67
	46	2084	1,62E-01	16,24	270734	100,00	2084	0,0	0	-7,8	66
	48	2090	4,83E-01	48,32	807902	100,00	2090	0,0	0	-8,0	65
	55	2855	5,92E-01	59,17	1351426	100,00	2855	0,0	6	-8,8	61
DQPSK	47	2095	7,58E-05	0,01	127	0,19	4	19,2	0	-8,3	65
	48	2259	2,00E-02	2,00	36136	38,78	876	13,1	0	-8,5	65
	50	2079	3,47E-01	34,71	577224	100,00	2079	0,0	0	-8,8	63
	55	2004	5,48E-01	54,81	878707	100,00	2004	0,0	5	-9,0	61
DBPSK	50	2018	1,92E-05	0,00	31	0,05	1	12,8	0	-9,3	64
	51	2154	2,24E-02	2,24	38546	40,81	879	9,6	0	-9,3	63
	52	2030	1,93E-01	19,28	313086	100,00	2030	0,0	0	-9,8	63
	55	2056	4,94E-01	49,44	813161	100,00	2056	0,0	0	-10,5	62
Robustní	59	133	4,99E-01	49,85	53044	100,00	133	0,0	996	-11,3	61
	54	2020	1,92E-05	0,00	31	0,10	2	4,8	0	-10,3	62
	55	2009	1,20E-02	1,20	19313	35,39	711	1,6	3	-10,3	62
	57	2006	3,80E-01	38,00	609886	100,00	2006	0,0	475	-11,3	61

Tab. 17: Naměřené výsledky první fáze měření

Z naměřených hodnot vyplývá, že systém je schopen překlenout vysoké hodnoty útlumu. Jakmile však systém začne prokazovat chybovost, tak se parametry přenosu s nepatrným nárůstem útlumu rapidně zhoršují. Jistého zlepšení pro všechny tři modulace by bylo dosaženo aktivováním RC bloku. Tato možnost nebyla použita z důvodu, že byly naměřeny hodnoty pro robustní mód, který určuje limity systému. Při útlumu 55 dB dochází již k chybám v záhlaví, což signalizuje limitující hodnotu pro přenos pro všechny typy modulací. Mezní hodnoty útlumu, při kterých je systém schopen spolehlivě a bez chyb pracovat, jsou:

- D8PSK: 44 dB
- DQPSK: 47 dB
- DBPSK: 50 dB
- Robustní: 53 dB



Obr. 90: Závislost chybovosti na útlumu pro jednotlivé modulace

10.3. Druhá fáze měření G3

Zapojení pracoviště a postup měření

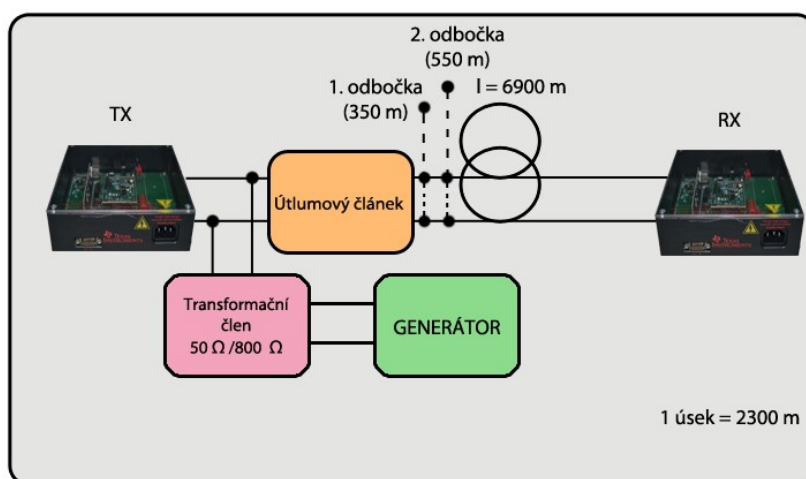
Ve druhé fázi byla trasa rozšířena o sdělovací vedení typu SYKFY o celkové délce 6,9 km. Trasa je rozdělena na tři úseky, kde každý z nich má délku 2,3 km. Struktura zapojení byla stejná a je znázorněna na obr. 91. Cílem měření bylo určit maximální možnou překlenutelnou délku, při které jsou PLC modemy schopné fungovat bez vykazování chybovosti. Pro dosažení hranice, kdy jednotlivé modulace začnou vykazovat chyby, byl použit opět útlumový článek. Je nutné mít na paměti, že celkový útlum je součtem útlumů vedení a článku. Celkový útlum je počítán jako průměrná hodnota útlumů na všech frekvencích pro dané pásmo (CENELEC A/B/BC). Generátor šumu byl opět nastaven na typ AWGN s amplitudou -12 dBm. Pro určení útlumu vedení a charakteristiky spektra pro danou trasu byl použit obvodový (spektrální) analyzátor. Parametry fyzické vrstvy jsou shrnuty v tab. 17 a byly nastaveny stejně jako v první fázi měření.

Měření bylo provedeno ve třech variantách:

- Trasa o délce 6,9 km bez odboček
- Trasa o délce 6,9 km s odbočkami
- Trasa pro pásmo CENELEC B a CENELEC BC

	Parametr	Hodnota
Přijímač a Vysílač	Modulace	D8PSK/DQPSK/BPS K/ROBO
	Level	32
	TMR	Ano
	Pásmo	CENELEC
	Tónová maska	CENELEC A-36
	AGC	Ano
Vysílač	Enable TX Test Mode	Ano
	Continuos	Ano
	Délka PPDU	100 bajtů
	Interval mezi PPDU	100 μ s
	Posloupnost dat	Static
Přijímač	Enable RX Test Mode	Ano
	Posloupnost dat	Static

Tab. 18: Parametry fyzické vrstvy modemu



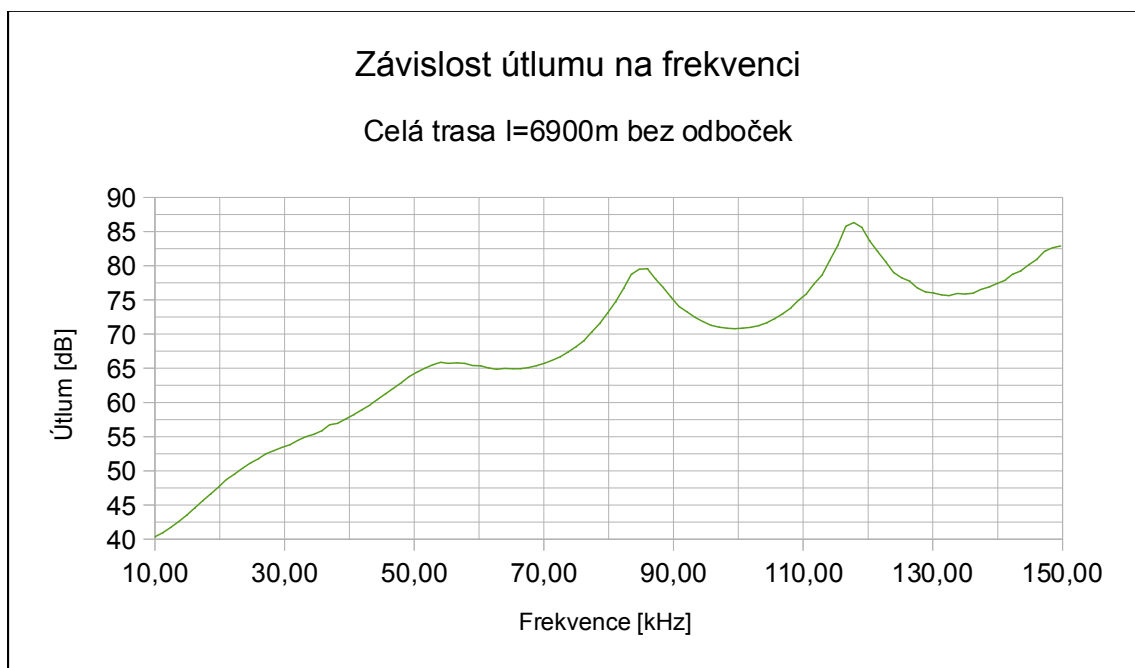
Obr. 91: Schéma zapojení pracoviště (druhá fáze měření)

10.3.1. Trasa o délce 6,9 km bez odboček

Při měření byly opět postupně měněny modulační schémata a útlum při konstantní hodnotě šumu. V průběhu měření byla hodnota útlumu zvyšována v závislosti na chybovosti dané modulace. Kolem hodnoty útlumu, kde daná modulace začala vykazovat chyby, bylo měření zhuštěno. Jedno měření bylo opět ukončeno po přijetí 2000 zpráv. Pro první variantu měření se hodnoty útlumu nastavované na článu pohybovaly v rozmezí 0-28 dB. Ke ztrátě synchronizace docházelo pro všechny modulace na hodnotě útlumu, nastavovaného na článu, rovné 28 dB.

Nejprve byla proměřena závislost útlumu na frekvenci dané trasy pomocí obvodového analyzátoru. Byly proměřeny všechny varianty pro první úsek trasy a pro celou trasu. Protože je útlum frekvenčně závislý, tak byl celkový útlum určen jako aritmetický průměr útlumů na jednotlivých frekvencích. Rozsah frekvencí v grafu odpovídá pásmu CENELEC, pro které

bylo měření realizováno.



Obr. 92: Závislost útlumu na frekvenci pro celou trasu bez odboček

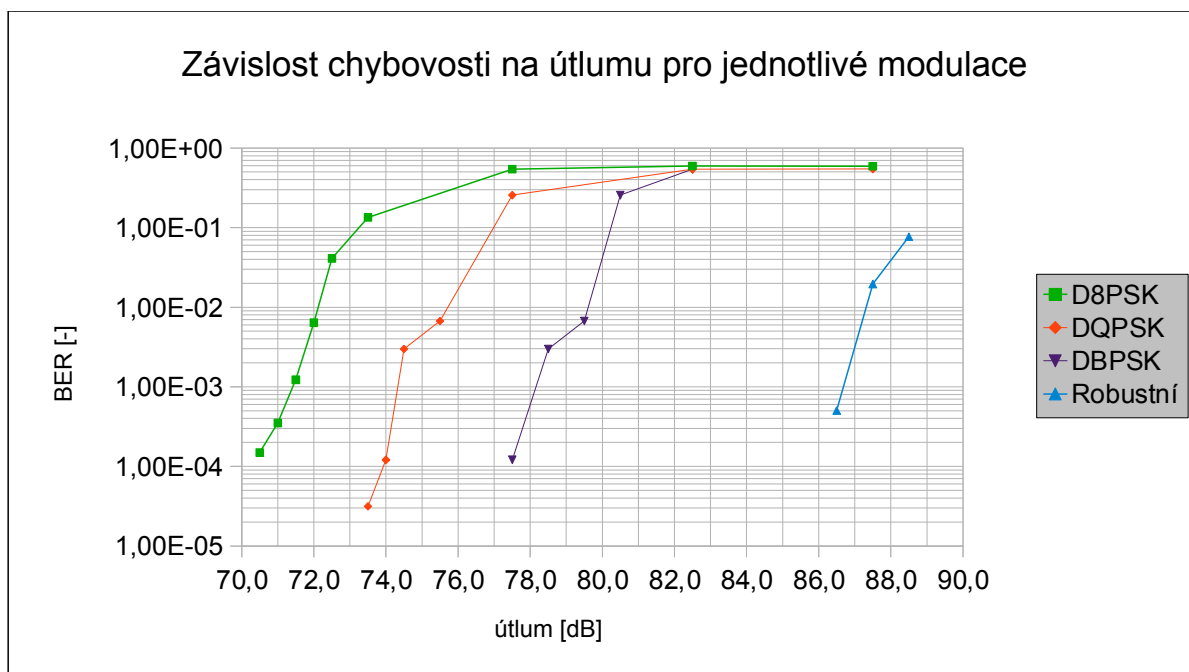
Z grafu vyplývá, že největší útlum pro pásmo CENELEC A je na frekvenci kolem 86 kHz. Průměrná hodnota útlumu celé trasy činí 62,5 dB, což znamená, že průměrný útlum vedení o délce 100 m se pohybuje kolem hodnoty 0,91 dB.

U modulace D8PSK se chyby začaly vyskytovat na hodnotě útlumu 70,5 dB. Chyby v záhlaví fyzické vrstvy se začaly projevovat na hodnotě 82,5 dB. Z naměřených hodnot je zřejmé, že se rozestup mezi robustností jednotlivých modulací opět pohybuje kolem hodnoty 3 dB. Kde rozestup mezi počátkem chybovosti u modulace D8PSK a DQPSK je 3 dB. Rozestup mezi DQPSK a DBPSK je roven 5 dB. Nejlepších výsledků dosáhl robustní režim modulace DBPSK. Rozdíl mezi hodnotami útlumu, kde se začíná projevovat chybovost, je 9 dB. Z toho vyplývá, že robustní režim standardu G3 je schopen překlenout mnohem větší vzdálenosti či kanál s větším výskytem chybovosti. Přenosová rychlost klesala s četností chyb a největší hodnota byla dle předpokladů opět naměřena u D8PSK modulace. Mezní hodnoty útlumu, při kterých je systém schopen spolehlivě a bez chyb pracovat, jsou:

- D8PSK: 70 dB
- DQPSK: 73 dB
- DBPSK: 77 dB
- Robustní: 85,5 dB

Typ modulace	Nastavovaný útlum [dB]	Celkový útlum [dB]	celkový počet detekovaných paketů	BER [-]	BER [%]	celkový počet chybných bitů [-]	PER [%]	celkový počet chybných paketů [-]	Přenosová rychlost [kb/s]	Počet chyb v záhlaví [-]	SNR [dB]	RSSI [dBuV]
D8PSK	0,0	62,5	2072	0,00E+00	0,00	0	0,00	0	24,5	0	-5,5	49
	5,0	67,5	2101	0,00E+00	0,00	0	0,00	0	23,6	0	-6,5	43
	8,0	70,5	2172	1,49E-04	0,01	259	0,23	5	24,5	0	-7,0	39
	8,5	71,0	2036	3,51E-04	0,04	571	0,69	14	24,5	0	-7,0	39
	9,0	71,5	2018	1,23E-03	0,12	1979	2,92	59	21,7	0	-7,3	39
	9,5	72,0	2014	6,38E-03	0,64	10277	14,35	289	22,7	0	-7,3	38
	10,0	72,5	2023	4,11E-02	4,11	66522	61,94	1253	11,3	0	-7,3	38
	11,0	73,5	2023	1,34E-01	13,38	216594	98,52	1993	0,0	0	-7,3	37
	15,0	77,5	2132	5,42E-01	54,20	924420	100,00	2132	0,0	0	-8,0	36
	20,0	82,5	2435	5,94E-01	59,39	1156899	100,00	2435	0,0	3	-8,3	36
25,0	87,5	2062	5,91E-01	59,06	974229	100,00	2062	0,0	518	-8,5	36	
DQPSK	0,0	62,5	2260	0,00E+00	0,00	0	0,00	0	19,2	0	-5,5	49
	5,0	67,5	2035	0,00E+00	0,00	0	0,00	0	19,2	0	-6,5	43
	10,0	72,5	2366	0,00E+00	0,00	0	0,00	0	19,2	0	-7,8	38
	11,0	73,5	2064	3,15E-05	0,00	52	0,05	1	19,2	0	-7,8	36
	11,5	74,0	2034	1,21E-04	0,01	197	0,20	4	19,2	0	-7,8	36
	12,0	74,5	3159	2,98E-03	0,30	7532	6,62	209	19,2	0	-8,0	36
	13,0	75,5	2015	6,72E-03	0,67	10831	13,40	270	15,7	0	-8,0	36
	15,0	77,5	2477	2,56E-01	25,57	506603	100,00	2477	0,0	1	-8,3	36
	20,0	82,5	2132	5,40E-01	54,01	921249	100,00	2132	0,0	2	-8,8	36
	25,0	87,5	2031	5,45E-01	54,51	885740	100,00	2031	0,0	1295	-9,0	36
DBPSK	0,0	62,5	2060	0,00E+00	0,00	0	0,00	0	12,8	0	-5,8	49
	15,0	77,5	2008	4,06E-04	0,04	652	0,55	11	12,8	0	-8,8	36
	16,0	78,5	2104	1,92E-03	0,19	3238	3,94	83	12,8	0	-8,8	36
	17,0	79,5	2005	2,29E-02	2,29	36733	38,85	779	8,8	0	-9,0	36
	18,0	80,5	2012	1,57E-01	15,67	252209	100,00	2012	0,0	0	-9,5	36
	20,0	82,5	2043	4,56E-01	45,60	745261	100,00	2043	0,0	4	-10,0	36
	25,0	87,5	2031	5,45E-01	54,51	885740	100,00	2031	0,0	1295	-9,0	36
	20,0	82,5	2125	0,00E+00	0,00	0	0,00	0	5,7	3	-9,8	36
Robustní	24,0	86,5	2011	5,01E-04	0,05	806	1,84	37	4,8	58	-10,3	36
	25,0	87,5	2001	1,96E-02	1,96	31339	44,13	883	2,4	90	-10,0	36
	26,0	88,5	2057	7,70E-02	7,70	126661	91,74	1887	0,0	189	-10,3	36

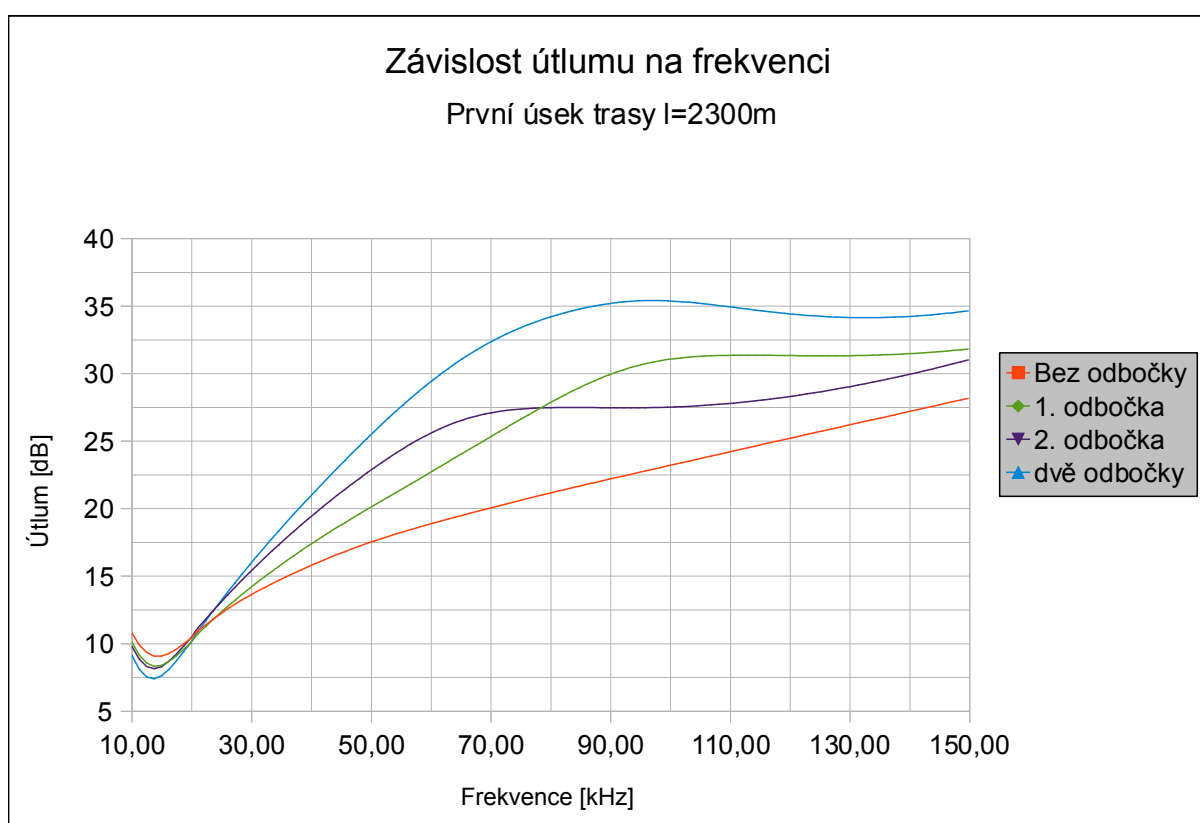
Tab. 19: Výsledné hodnoty měření první varianty



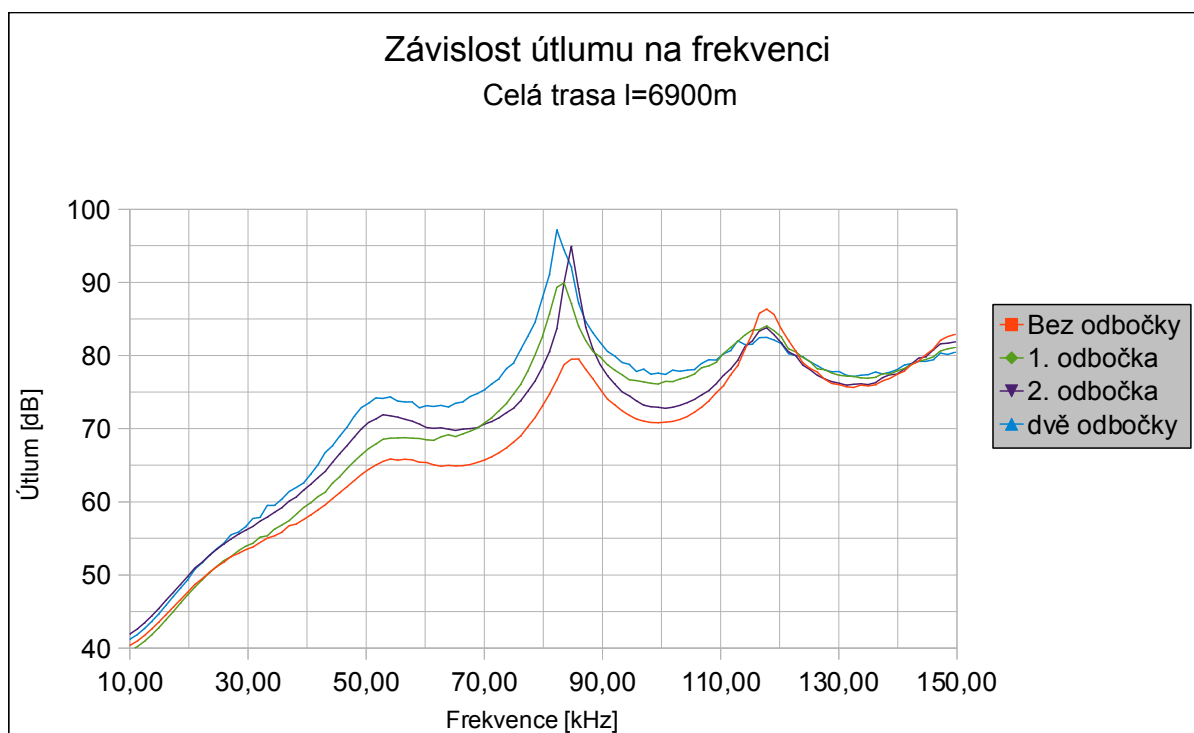
Obr. 93: Závislost chybovosti na útlumu pro první variantu měření

10.3.2. Trasa o délce 6,9 km s odbočkami

V této variantě měření trasy s odbočkami se rozmezí nastavovaných útlumů pohybovalo v intervalu 0-20 dB a ztrátě synchronizace docházelo při hodnotě útlumu 21 dB. Na vedení byly paralelně připojeny dvě odbočky na prázdkno. První odbočka měřila 350 m a byla zapojena na počátek trasy. Druhá odbočka měla délku 550 m a byla zapojena na konec prvního úseku trasy. Odbočky se v reálné síti mohou vyskytovat a to vlivem opravy kabelů nebo například při využití mnohabodové topologie speciálních průmyslových sítí. Zapnuté TMR opět při měření nemělo vliv na chybovost. Trasa byla znovu změřena pomocí obvodového analyzátoru. Odbočky by měly, dle teoretických předpokladů, přidávat na trase zhruba 6 dB útlumu. To je možné ověřit na následujících grafech.



Obr. 94: Závislost útlumu na frekvenci pro první úsek trasy



Z výsledků je zřejmé, že každá z odboček působí na odlišných frekvencích nárůstem útlumu. Útlum je způsoben skutečností, že signál se v místě připojení odbočky šíří i do těchto odboček a dojde tak k rozdělení signálu. Signál se na konci odbočky odrazí a v místě připojení dojde k sečtení tohoto odraženého a užitečného signálu. Záleží také na fázích odraženého a užitečného signálu. Pokud jsou signály v protifázi, dojde k nárůstu útlumu a pokud jsou ve fázi, dojde k poklesu útlumu na určitých frekvencích. Tyto lokální extrémy na daných frekvencích se periodicky opakují s každým lichým násobkem této frekvence. Odhad, na jakých frekvencích se bude vyskytovat lokální maximum útlumu, je dán vztahem:

$$f_{min} = \frac{(2k+1) \times v}{4 \times l_{odb}} \quad (13)$$

Kde l_{odb} je délka odbočky a v je rychlost šíření signálu, které je dána následujícím vztahem:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (14)$$

Největší útlum způsobuje druhá odbočka na frekvenci 82,3 kHz s hodnotou útlumu 97,2 dB. Průměrováním útlumu byl dosažen celkový útlum, který je roven hodnotě 69,5 dB. Celková trasa pouze s první odbočkou měla maximální útlum na frekvenci 83,5 kHz roven hodnotě 89,9 dB a trasa pouze s druhou odbočkou na frekvenci 84,7 kHz dosáhla útlumu 94,9 dB. Maximální útlumy na příslušných kmitočtech zhruba odpovídají teoretickým

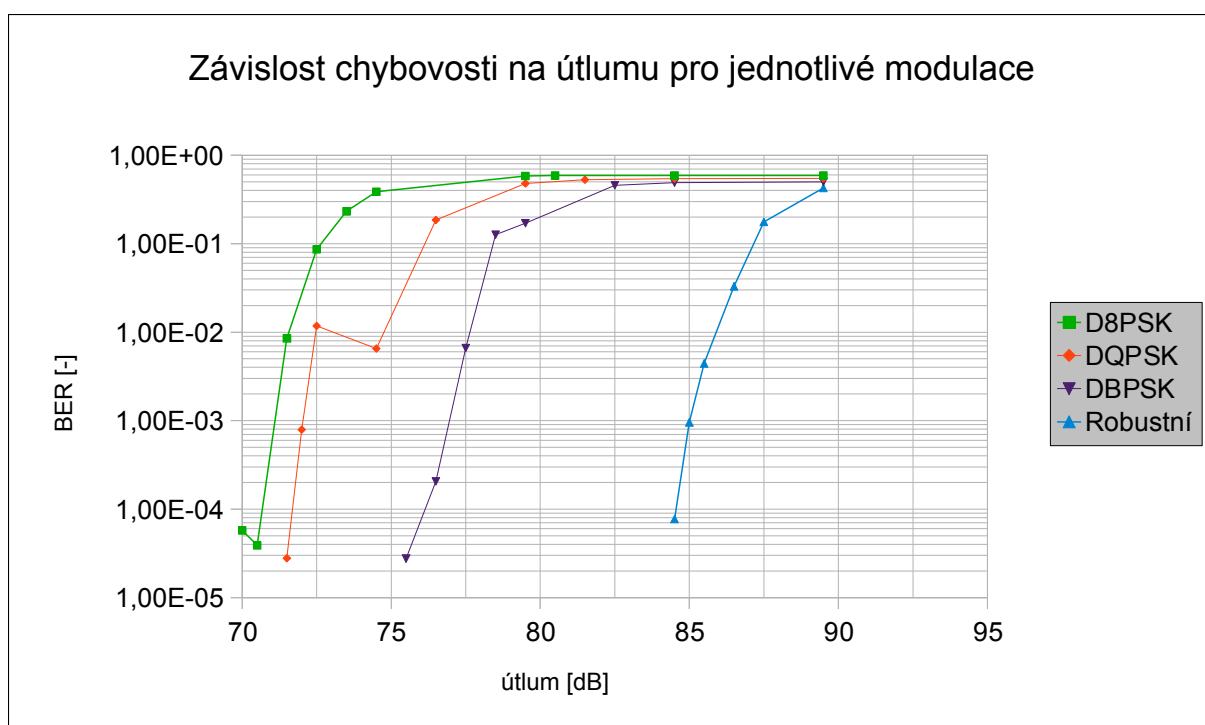
předpokladům, které byly vypočítány z výše uvedeného vztahu.

Typ modulace	Nastavovaný útlum [dB]	Celkový útlum [dB]	celkový počet detekovaných paketů	BER [-]	BER [%]	celkový počet chybných bitů [-]	PER [%]	celkový počet chybných paketů [-]	Přenosová rychlost [kb/s]	Počet chyb v záhlaví [-]	SNR [dB]	RSSI [dBuV]
D8PSK	0	69,5	2024	0,00E+00	0,00	0	0,00	0	23,6	0	-6,3	44
	0,5	70	2005	5,74E-05	0,01	92	0,10	2	24,5	0	-6,3	43
	1	70,5	2053	3,90E-05	0,00	64	0,10	2	24,5	0	-6,5	42
	2	71,5	2023	8,49E-03	0,85	13734	17,80	360	19,8	0	-7,0	41
	3	72,5	2188	8,62E-02	8,62	150818	91,36	1999	2,8	0	-7,3	39
	4	73,5	2017	2,32E-01	23,23	374842	100,00	2017	0,0	0	-7,5	38
	5	74,5	2021	3,86E-01	38,61	624314	100,00	2021	0,0	0	-7,5	37
	10	79,5	2051	5,83E-01	58,33	957080	100,00	2051	0,0	0	-8,0	36
	11	80,5	2305	5,90E-01	58,96	1087203	100,00	2305	0,0	4	-8,3	36
	15	84,5	2130	5,89E-01	58,91	1003908	100,00	2130	0,0	50	-8,5	36
20	89,5	581	5,89E-01	58,93	273900	89,16	518	0,0	959	-8,5	36	
DQPSK	0	69,5	2023	0,00E+00	0,00	0	0,00	0	19,2	0	-6,3	44
	2	71,5	2019	2,79E-05	0,00	45	0,05	1	19,2	0	-7,3	41
	2,5	72	2014	7,92E-04	0,08	1276	1,74	35	19,1	0	-7,5	40
	3	72,5	2029	1,18E-02	1,18	19087	21,54	437	13,9	0	-7,5	39
	5	74,5	2036	6,52E-03	0,65	10621	13,36	272	18,3	0	-7,8	37
	7	76,5	2095	1,85E-01	18,49	309811	100,00	2095	0,0	0	-8,3	36
	10	79,5	2010	4,80E-01	47,98	771485	100,00	2010	0,0	0	-8,5	36
	12	81,5	2008	5,29E-01	52,93	850298	100,00	2008	0,0	11	-8,5	36
	15	84,5	2192	5,44E-01	54,43	954478	100,00	2192	0,0	51	-8,8	36
	20	89,5	196	5,48E-01	54,78	85888	100,00	196	0,0	293	-8,8	36
DBPSK	0	69,5	2000	0,00E+00	0,00	0	0,00	0	12,8	0	-6,3	44
	6	75,5	2000	2,75E-05	0,00	44	0,05	1	12,8	0	-8,5	36
	7	76,5	2010	2,05E-04	0,02	330	0,45	9	12,8	0	-8,8	36
	8	77,5	2033	6,62E-03	0,66	10762	13,38	272	10,4	0	-9,0	36
	9	78,5	2050	1,27E-01	12,68	207924	98,24	2014	0,0	0	-9,0	36
	10	79,5	2006	1,71E-01	17,06	273800	99,60	1998	0,8	2	-9,3	36
	13	82,5	2029	4,57E-01	45,74	742530	100,00	2029	0,0	15	-9,8	36
	15	84,5	2005	4,91E-01	49,13	788100	100,00	2005	0,0	43	-10,0	36
	20	89,5	300	5,01E-01	50,08	120190	100,00	300	0,0	202	-10,3	36
	Robustní	0	69,5	2007	0,00E+00	0,00	0	0,00	0	5,7	0	-6,3
15		84,5	2188	7,71E-05	0,01	135	0,37	8	3,2	57	-10,0	36
15,5		85	2004	9,56E-04	0,10	1533	3,59	72	4,0	43	-10,0	36
16		85,5	2003	4,44E-03	0,44	7112	14,08	282	3,2	73	-10,0	36
17		86,5	2005	3,30E-02	3,30	53003	62,64	1256	2,4	137	-10,0	36
18		87,5	2017	1,76E-01	17,64	284584	100,00	2017	0,0	321	-10,5	36
20		89,5	192	4,28E-01	42,77	65691	100,00	192	0,0	180	-10,8	36

Tab. 20: Výsledné hodnoty měření druhé varianty

Z výsledků je na první pohled patrné, že teoretické předpoklady byly správné. Přidáním odboček došlo ke zvýšení útlumu o 7 dB. Hranice, kde se poprvé začnou vyskytovat chyby u modulace D8PSK, je přibližně shodná s hranicí u první varianty měření a její hodnota je 70 dB. U první varianty měření to byla hodnota 70,5 dB. Hranice, kdy se začnou vyskytovat chyby v záhlaví fyzické vrstvy, je 80,5 dB. Rozdíly hodnot útlumů, kdy jednotlivé modulace začaly vykazovat chybovost, jsou totožné s první variantou až na modulaci D8PSK. Rozdíl modulace D8PSK a DQPSK je v tomto případě 1,5 dB. To může být zapříčiněno faktem, že modulace D8PSK je nejméně odolná vůči šumu a ostatním negativním vlivům na vedení. Z uvedených výsledků je zřejmé, že odbočky na vedení mají poměrně značný vliv v podobě lokálních maxim útlumu, což má negativní vliv na dané pásmo frekvencí. Systémy G3-PLC však tyto frekvence mohou deaktivovat a nebudou se na nich vysílat užitečný signál. Mezní hodnoty útlumu, při kterých je systém schopen spolehlivě a bez chyb pracovat, jsou:

- D8PSK: 69,5 dB
- DQPSK: 71 dB
- DBPSK: 75 dB
- Robustní: 84 dB



Obr. 96: Závislost chybovosti na útlumu při měření druhé varianty

10.3.3. Trasa pro pásmo CENELEC B a CENELEC BC

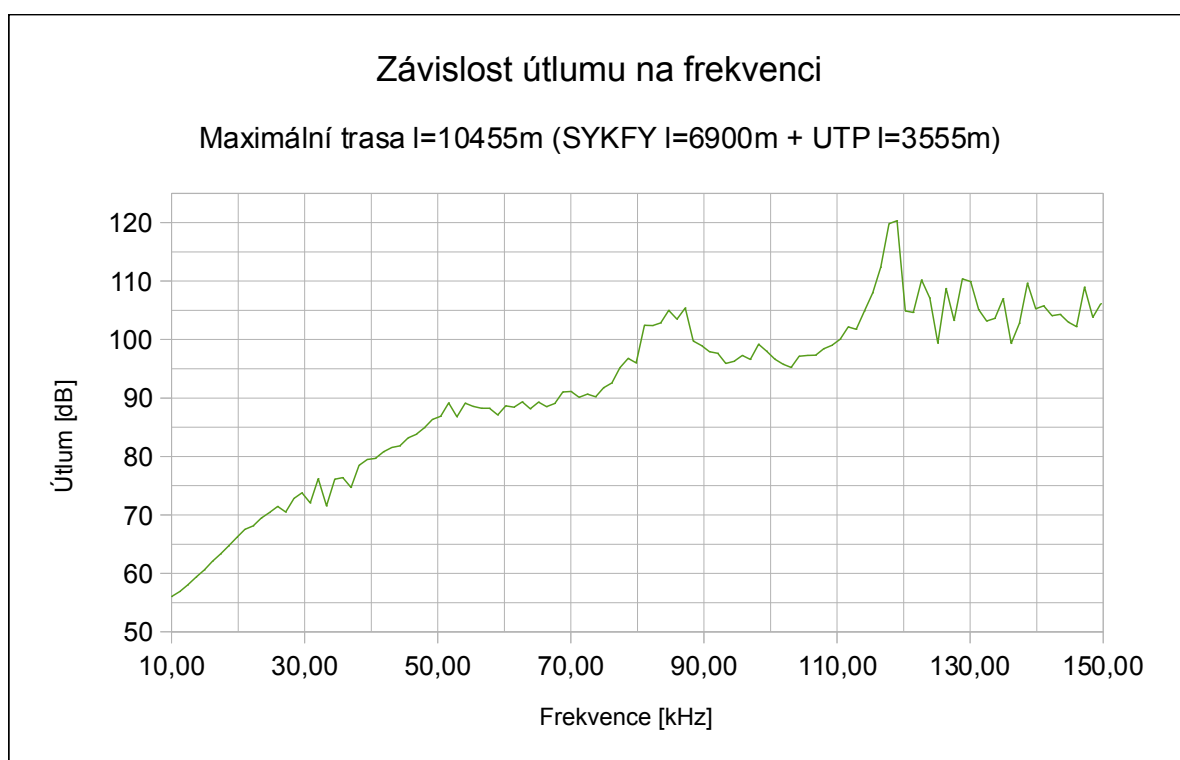
V poslední variantě měření pro pásmo B a BC nebylo možné proměřit modulace D8PSK, DQPSK a DBPSK z důvodu ztráty synchronizace již při nízkých hodnotách útlumu. To bych odůvodnil skutečností, že modemy jsou primárně určeny pro pásmo CENELEC A a nejsou na ostatní pásma plně optimalizovány. Hodnoty útlumu nastavované při měření v pásmu CENELEC B se pohybovaly v rozmezí 6-9 dB. Ztráta synchronizace nastávala po celou dobu měření i u robustního režimu modulace. Na hodnotách vyšších jak 9 dB již ztráta synchronizace převažovala nad přenosem dat. Trasa pro toto měření se skládala pouze z prvního a druhého úseku celkové trasy (4,6 km). V trase se dále nacházely obě dvě odbočky. V pásmu CENELEC BC bylo měření realizováno pouze na prvním úseku trasy s první odbočkou. Hodnoty útlumu nastavované na článku se pohybovaly v rozmezí 8-16 dB. Měření v obou pásmech bylo ukončeno po přijetí zhruba 350 paketů. To je zapříčiněno dlouhým časovým intervalem měření, které odpovídá době měření u ostatních variant. Dlouhý časový interval měření byl zapříčiněn neustálou ztrátou synchronizace. Snížení úseků trasy bylo nutné z důvodu, že B a BC pásmo mají menší počet nosných kmitočtů a zároveň se na těchto vyšších frekvencích projevuje větší útlum.

Pouze první a druhý úsek (l=4600m) s první a druhou odbočkou (l _{o1} =350m a l _{o2} =550m)												
Typ modulace	Nastavovaný útlum [dB]	Celkový útlum [dB]	celkový počet detekovaných paketů	BER [-]	BER [%]	celkový počet chybných bitů [-]	PER [%]	celkový počet chybných paketů [-]	Přenosová rychlost [kb/s]	Počet chyb v záhlaví [-]	SNR [dB]	RSSI [dBuV]
Robustní B pásmo	6	64,5	1025	1,59E-04	0,02	130	0,59	6	1,3	124	-10,0	36
	7	65,5	1004	9,24E-04	0,09	742	3,98	40	1,3	134	-10,3	36
	8	66,5	347	4,32E-03	0,43	1198	10,66	37	0,9	57	-10,3	36
	9	67,5	317	1,48E-02	1,48	3758	41,01	130	0,4	60	-10,3	36
Pouze první úsek (l=2300m) s první odbočkou (l _{o1} =350m)												
Robustní BC pásmo	8	40,2	365	4,08E-04	0,04	119	1,64	6	3,7	8	-10,5	49
	9	41,2	359	5,75E-04	0,06	165	2,23	8	3,0	9	-10,3	48
	10	42,2	363	5,20E-04	0,05	151	2,20	8	3,0	12	-10,5	47
	11	43,2	351	2,29E-03	0,23	642	8,83	31	3,0	23	-10,3	46
	12	44,2	343	4,87E-03	0,49	1336	15,74	54	2,2	22	-10,5	45
	13	45,2	349	1,03E-02	1,03	2868	30,09	105	1,5	19	-9,8	44
	14	46,2	353	1,95E-02	1,95	5519	45,89	162	0,7	52	-10,0	44
16	48,2	350	6,24E-02	6,24	17478	89,71	314	0,7	115	-9,5	42	
Pouze první a druhý úsek (l=4600m) s první a druhou odbočkou (l _{o1} =350m a l _{o2} =550m)												
Robustní BC pásmo	0	58,5	202	1,72E-01	17,18	27760	100,00	202	0,0	281	-9,8	37

Tab. 21: Výsledné hodnoty měření B a BC pásma

Největší pokles výkonu s hodnotou 59,8 dB v pásmu B byl naměřen pro frekvenci 110,45 kHz. Celkový útlum vedení byl opět získán průměrováním všech útlumů na příslušných frekvencích a jeho hodnota je rovna 58,53 dB pro pásmo B. Vlivem dočasné ztráty synchronizace v celém intervalu měření je zřejmé, že se zároveň u všech naměřených hodnot objevují chyby v záhlaví FCH. Pro pásmo BC byl zaznamenán největší pokles výkonu s hodnotou 62,6 dB na frekvenci 139,85 kHz. Tato hodnota ležela v pásmu C. a pro pásmo BC je to 32,2 dB. Toto měření však bylo nutné realizovat pouze na jednom úseku s první odbočkou. Pro porovnání je v tabulce uvedena jedna hodnota pro pásmo BC při stejné délce trasy, s jakou bylo měřeno pásmo B.

V poslední řadě bylo provedeno měření největší možné vzdálenosti, na kterou je možné pomocí G3-PLC komunikovat. Při tomto měření byl vysílací modem odpojen od USB portu počítače, aby nedocházelo k parazitnímu přenosu signálu a generátor šumu byl vypnut. Pro tuto možnost byla zvolena robustní varianta modulace. Trasa se skládala ze tří úseku SYKFY bez odboček a dále UTP kabelu o délce 3 555 m. Celková délka tedy činila 10 455 m. Při této vzdálenosti se začaly vyskytovat chyby. Průměrná hodnota útlumu byla stanovena na 84,6 dB. Tato skutečnost zhruba odpovídá první variantě měření, kde se chyby v robustním režimu začaly vyskytovat při hodnotě 86,5 dB. Rozdíl může být způsoben jinými parametry UTP vedení. Z grafu je patrné, že na takto velkou vzdálenost již není možné provozovat přenos dat v jiných pásmech než CENELEC A, protože křivka od cca 110 kHz již překračuje hodnotu 100 dB a signál nelze odlišit od šumu.

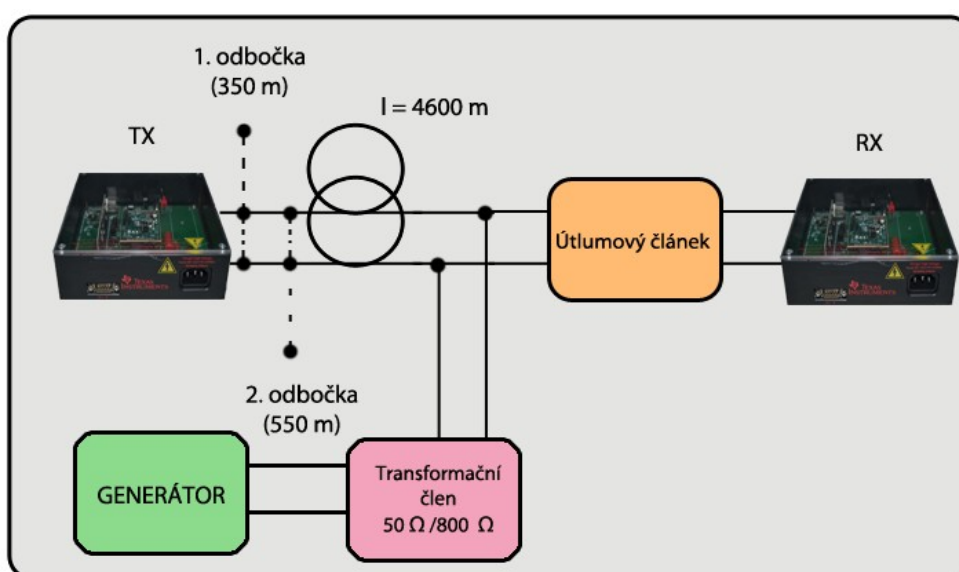


Obr. 97: Závislost útlumu na frekvenci pro maximální dosaženou vzdálenost

Experimentálně byly PLC modemy vyzkoušeny také na živém elektrickém vedení v domácnosti na vzdálenost do 20 metrů. Komunikace probíhala pro všechny typy modulačních schémat dle očekávání a bez chyb. Chybovost by se samozřejmě projevila při mnohem větších vzdálenostech.

10.4. Třetí fáze měření G3

V této fázi měření bylo zapojení pracoviště poupraveno. Útlumový článek společně s generátorem šumu byl v tomto případě přemístěn blíže k přijímacímu PLC modemu. Vzhledem ke skutečnosti, že takto injektovaný šum značně zvyšuje chybovost, bylo nutné zkrátit celkovou trasu vedení. Ta se skládala pro tuto fázi pouze ze dvou úseků o celkové délce 4,6 km a dvou odboček. Schéma zapojení trasy je znázorněno na obr. 98. Cílem měření v tomto případě bylo určit, jaký druh šumu má největší vliv na chybovost komunikace. Celkový útlum je opět počítán jako aritmetický průměr poklesů výkonu na jednotlivých frekvencích, který byl opět stanoven pomocí obvodového analyzátoru. Měření bylo prováděno pro pásmo CENELEC A. Měření pro AWGN, úzkopásmový a impulsní šum. Nastavení parametrů fyzické vrstvy jsou shodné s předchozí fází měření viz tabulka 18.



Obr. 98: Zapojení měřicího pracoviště (Třetí fáze měření)

Výsledky jsou rozděleny na tři sekce:

- Měření s AWGN
- Měření s úzkopásmovým rušením
- Měření s impulsním rušením

10.4.1. Měření s AWGN

Tento typ šumu je přítomný v každé síti. Generátor byl nastaven do režimu generování šumu s amplitudou -12 dBm. V této trase je signifikantní útlum s hodnotou 56,3 dB na kmitočtu 94,53 kHz. Z výsledků je patrné, že při této konfiguraci zapojení s injektovaným šumem se začínají projevovat chyby při nižších hodnotách útlumu a zároveň i na kratší vzdálenost. Rozdíl naměřených hodnot celkového útlumu ve variantě s odbočkami o délce 6,9 km s tímto měřením je 11,27 dB. Hranice, kdy se poprvé začaly objevovat chyby v záhlaví FCH pro modulaci D8PSK, je 67,53 dB. Rozdíl v robustnosti u modulací je následující:

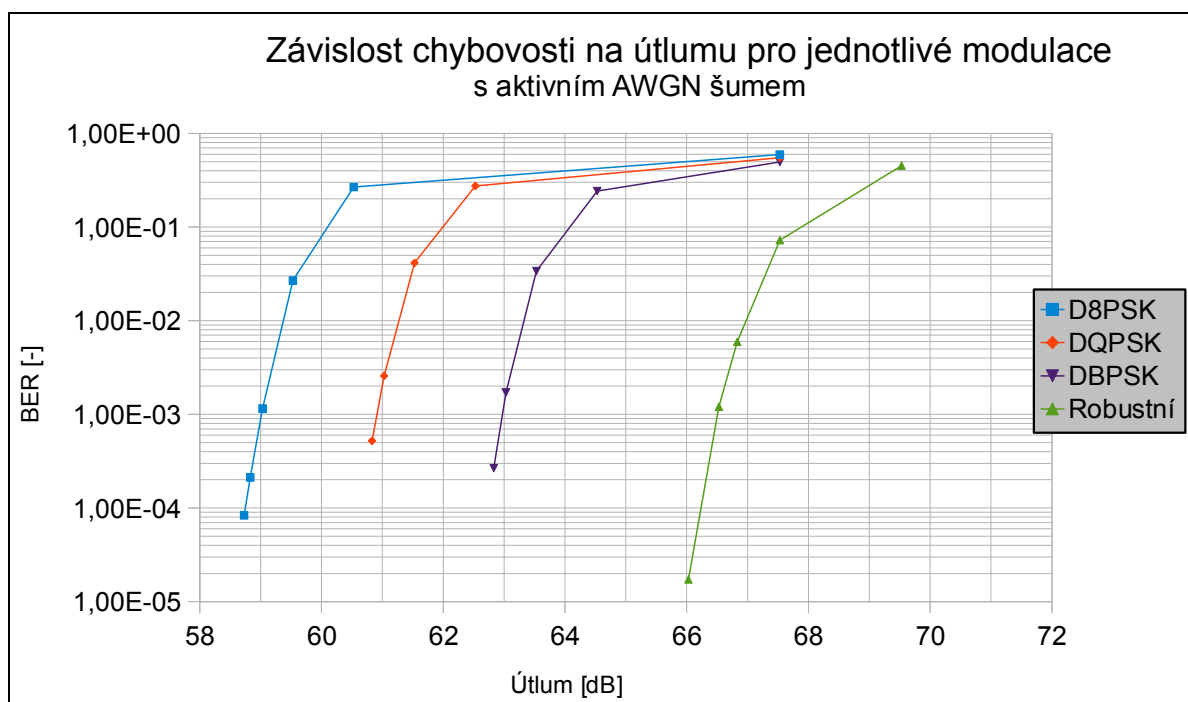
- D8PSK a DQPSK: 2,1 dB
- DQPSK a DBPSK: 2 dB
- DBPSK a robustní režim DBPSK: 3 dB

Z výsledků je tedy zřejmé, že modulace se chovají naprosto stejně při zatížení AWGN šumem blízko přijímače. Nejvíce výhodné je opět použití robustní varianty DBPSK, avšak za cenu nízké přenosové rychlosti. Ztráta synchronizace docházela u všech modulací při útlumu 72,53 dB. Z teoretických hodnot SNR pro příslušné modulace je možné určit kódový zisk modemů. Ten lze určit tak, že si zvolíme hranici chybovosti, pro kterou chceme porovnávat SNR. Pro tento případ volím hranici chybovosti rovnu $1E-4$. Z naměřených hodnot modulace D8PSK tomu odpovídá hodnota SNR rovna -7,3 dB. Z teoreticky vypočítaných křivek závislosti BER na SNR pro jednotlivé diferenciální modulace, které jsou zobrazeny na obr. 99, je určená hodnota SNR rovna 14,5 dB pro příslušnou chybovost modulace D8PSK. Výsledky ukazují, že modulace fungují při mnohem nižším poměru signál šum, než jsou teoretické hodnoty bez korekčních metod. To ukazuje na skutečnost, že již od počátku je mechanismus G3 projektován s cílem provozovat systém na vedeních s předpokládaným nízkým SNR. Hraniční hodnoty útlumu, při kterých je systém schopen spolehlivě a bez chyb pracovat, jsou:

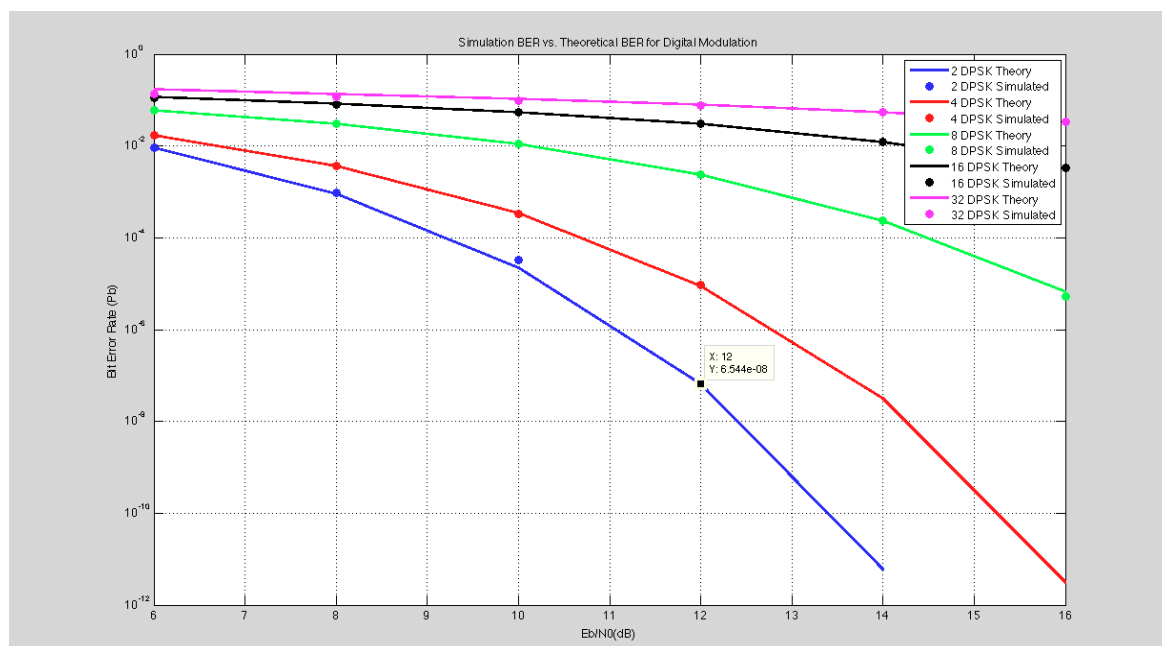
- D8PSK: 58 dB
- DQPSK: 59 dB
- DBPSK: 61 dB
- Robustní: 65 dB

Typ modulace	Nastavovaný útlum [dB]	Celkový útlum [dB]	celkový počet detekovaných paketů	BER [-]	BER [%]	celkový počet chybných bitů [-]	PER [%]	celkový počet chybných paketů [-]	Přenosová rychlost [kb/s]	Počet chyb v záhlaví [-]	SNR [dB]	RSSI [dBuV]
D8PSK	0	58,53	2061	0,00E+00	0,00	0	0,00	0	23,6	0	-7,3	67
	0,2	58,73	2169	8,36E-05	0,01	145	0,28	6	23,6	0	-7,3	67
	0,3	58,83	2000	2,12E-04	0,02	339	0,50	10	23,6	0	-7,3	67
	0,5	59,03	2416	1,15E-03	0,12	2224	2,90	70	23,6	0	-7,3	67
	1	59,53	2079	2,69E-02	2,69	44691	48,44	1007	12,3	0	-7,5	66
	2	60,53	2015	2,67E-01	26,74	431052	100,00	2015	0,0	0	-7,8	65
	9	67,53	2001	5,96E-01	59,55	953297	100,00	2001	0,0	12	-8,8	62
DQPSK	2,3	60,83	2368	5,22E-04	0,05	988	1,31	31	19,2	0	-8,3	65
	2,5	61,03	2004	2,58E-03	0,26	4135	5,69	114	19,2	0	-8,3	65
	3	61,53	2007	4,14E-02	4,14	66461	64,57	1296	6,1	0	-8,5	65
	4	62,53	2000	2,76E-01	27,55	440814	100,00	2000	0,0	0	-8,8	64
	9	67,53	2018	5,50E-01	55,04	888512	100,00	2018	0,0	8	-9,0	62
DBPSK	4,3	62,83	2011	2,65E-04	0,03	427	0,70	14	13,6	0	-9,3	64
	4,5	63,03	2022	1,71E-03	0,17	2766	3,96	80	12,8	0	-9,3	64
	5	63,53	2074	3,38E-02	3,38	56060	56,17	1165	7,2	0	-9,5	62
	6	64,53	2025	2,43E-01	24,29	393520	100,00	2025	0,0	0	-9,5	64
	9	67,53	2000	4,96E-01	49,58	793243	100,00	2000	0,0	9	-10,5	61
Robustní	7,5	66,03	2030	1,72E-05	0,00	28	0,10	2	4,9	0	-10,3	62
	8	66,53	2092	1,21E-03	0,12	2020	4,54	95	4,9	0	-10,5	62
	8,3	66,83	2040	5,96E-03	0,60	9729	49,17	1003	4,0	2	-10,8	62
	9	67,53	2000	7,26E-02	7,26	116173	94,15	1883	0,0	6	-10,8	62
	11	69,53	1381	4,53E-01	45,34	500952	100,00	1381	0,0	719	-11,0	61

Tab. 22: Výsledné hodnoty měření s AWGN



Obr. 99: Závislost útlumu na frekvenci pro kanál zatížený AWGN šumem



Obr. 100: Závislost chybovosti jednotlivých diferenciálních modulací na SNR

Modulace	úroveň chybovosti BER [-]	SNR		
		naměřené [dB]	teoretické [dB]	zisk [dB]
D8PSK	1,00E-004	-7,3	14,5	21,8
DQPSK	1,00E-004	-8,3	10,8	19,1
DBPSK	1,00E-004	-9,3	9,2	18,5

Tab. 23: Tabulka kódových zisků

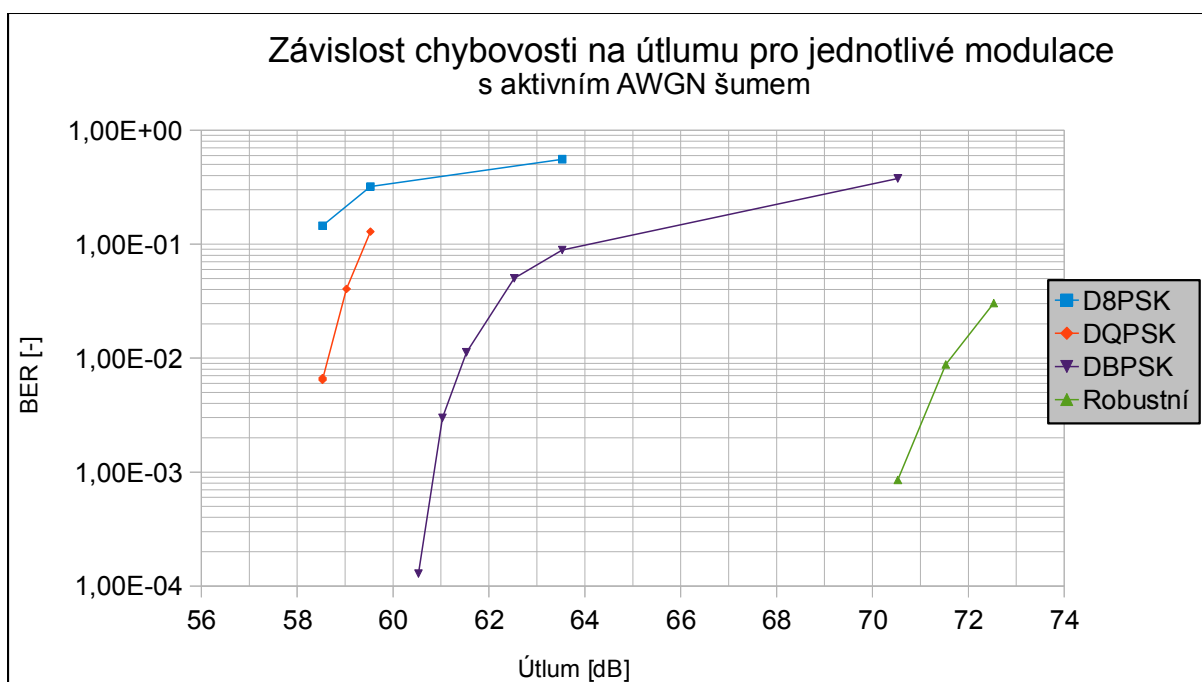
10.4.2. Měření s úzkopásmovým rušením

Úzkopásmové rušení je generováno v reálné síti například měničem frekvencí, monitory nebo televizory. Pro vytvoření úzkopásmového rušení bylo nutné přenastavit generátor. Amplituda byla ponechána na stejné hodnotě -12 dBm. Dále byl generován sinusový signál o frekvenci 77,5 kHz s AM modulací, jejíž obálka měla frekvenci 500 Hz. Takto nastavený generátor vybudil úzkopásmové rušení na centrální frekvenci 77,5 kHz v pásmu širokém 1 kHz, kde na krajních bodech (77 a 78 kHz) vzniklo rušení dolním a horním postranním pásmem. Rozsah měření útlumu při úzkopásmovém rušení se pohyboval v intervalu 58,53 - 72,53 dB. Z výsledků je na první pohled patrné, že úzkopásmové rušení má mnohem větší vliv na chybovost u méně robustních modulací. D8PSK modulace již při nulové hodnotě nastavovaného útlumu vykazovala velkou chybovost, při které již není možné spolehlivě přenášet data. Naopak robustní režim modulace dosáhl zlepšení. Oproti předchozímu měření s AWGN šumem začal vykazovat stejnou chybovost až při útlumu o 5 dB větším než v předchozí variantě. To je dáno vlivem RC bloku. Pro kanál s úzkopásmovým rušením je dále výhodné používat modulaci DBPSK, kde se chyby začaly projevovat při útlumu 60,53 dB což je sice zhruba o 2 dB méně než u předchozí varianty, ale modulace při stejných podmínkách trasy dokáže spolehlivě přenášet data i s úzkopásmovým rušením. Rozdíl v robustnosti více stavových modulací je stejný jako u předchozího měření, nicméně rozdíl mezi DBPSK a její nejrobustnější variantou je 10 dB, z čehož je patrné, že pro úzkopásmové rušení je tato modulace nejvýhodnější. Byl zkoumán i vliv TMR. Ten opět nijak výrazně neovlivňuje chybovost jak je patrné z ukázkové hodnoty v tabulce. Hraniční hodnoty útlumu, při kterých je systém schopen spolehlivě a bez chyb pracovat, má tedy cenu řešit pouze pro DBPSK a robustní režim:

- DBPSK: 59,53 dB
- Robustní: 69,53 dB

Typ modulace	Nastavovaný útlum [dB]	Celkový útlum [dB]	celkový počet detekovaných paketů	BER [-]	BER [%]	celkový počet chybných bitů [-]	PER [%]	celkový počet chybných paketů [-]	Přenosová rychlost [kb/s]	Počet chyb v záhlaví [-]	SNR [dB]	RSSI [dBuV]	Pozn.:
D8PSK	0	58,53	2147	1,45E-01	14,50	249042	100,00	2147	0,9	0	-7,8	72	
	1	59,53	2284	3,20E-01	31,99	584510	100,00	2284	0,0	0	-8,0	73	
	5	63,53	2146	5,56E-01	55,63	955054	100,00	2146	0,0	0	-8,3	73	
DQPSK	0	58,53	2103	6,69E-03	0,67	11253	16,64	350	16,7	0	-8,5	72	
	0,5	58,53	2013	6,44E-03	0,64	10369	16,59	334	16,7	0	-8,5	72	bez TMR
	1	59,03	2014	4,05E-02	4,05	65248	66,39	1337	4,4	0	-8,8	73	
DBPSK	2	59,53	2008	1,29E-01	12,89	207051	99,65	2001	0,9	0	-8,5	71	
	2	60,53	2022	1,29E-04	0,01	208	0,49	10	12,8	0	-9,0	73	
	2,5	61,03	2293	2,99E-03	0,30	5491	8,85	203	10,4	0	-9,3	71	
	3	61,53	2009	1,12E-02	1,12	18074	27,13	545	9,6	0	-8,8	71	
	4	62,53	2339	5,01E-02	5,01	93826	86,45	2022	1,6	0	-8,5	72	
Robustní	5	63,53	2031	8,87E-02	8,87	144158	100,00	2031	0,0	0	-9,0	71	
	12	70,53	2014	3,78E-01	37,77	608516	100,00	2014	0,0	50	-9,5	74	
	12	70,53	2060	8,54E-04	0,09	1407	8,01	165	4,0	76	-9,5	74	
	13	71,53	1062	8,78E-03	0,88	7462	51,22	544	0,8	292	-9,8	74	
	14	72,53	1221	3,04E-02	3,04	29696	94,68	1156	0,0	981	-9,8	73	

Tab. 24: Výsledné hodnoty měření s úzkopásmovým šumem



Obr. 101: Závislost útlumu na frekvenci pro kanál zatížený úzkopásmovým rušením

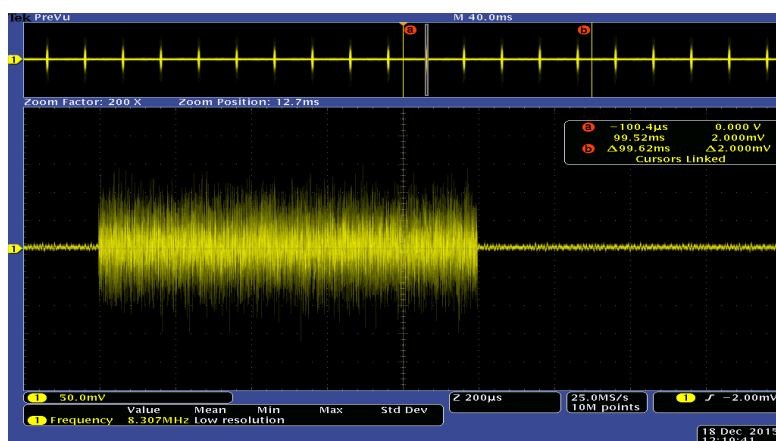
10.4.3. Měření s impulsním rušením

Impulsní rušení je typické krátkými napěťovými špičkami, které trvají určitý čas (nejčastěji μs nebo ms). Tento typ rušení nejvíce generují spínané zdroje, které jsou obsaženy ve většině elektroniky, jako jsou adaptéry, televize, počítače nebo audio systémy. Postup měření v tomto případě se odlišoval od ostatních typů v nastavovaném parametru. Pro možnost porovnání například s AWGN šumem byl zvolen postup, kde hodnota útlumu byla po celou dobu měření konstantní a místo toho byla nastavována amplituda impulsu. Cílem bylo určit, při jak velkých hodnotách amplitudy impulsu se docílí stejné chybovosti, které bylo dosaženo při konstantní hodnotě AWGN. Nicméně vlivem nedostatečného rozsahu generátoru, kde nebylo možné zvyšovat amplitudu impulsu nad mez $U_{pp} = 9 \text{ V}$, bylo nutné pro jednotlivé modulace navyšovat i útlum. Byla provedena dvě měření.

V první variantě bylo na trasu vloženo pouze impulsní rušení, které však nepřineslo očekávaný výsledek a nebylo možné donutit robustní režim k vykazování chyb pouze zvýšením amplitudy impulsu. Proto v druhé variantě bylo současně s impulsním rušením generováno i AWGN rušení o konstantní amplitudě signálu -12 dBm . Celková trasa opět tvořila dva úseky a dvě odbočky.

Impulsní rušení, které bylo použito pro měření je typu REIN (*Repetitive Electric Impulse Noise*). Podobu tohoto rušení lze pozorovat na obr. 102. Parametry rušení jsou následující:

- Doba jedné periody: 10 ms
- Doba rušení v jedné periodě: 1 ms



Obr. 102: Impulsní rušení typu RAIN

Typ modulace	Amplituda impulsu U _{pp} [V]	Nastavovaný útlum [dB]	Celkový útlum [dB]	celkový počet detekovaných paketů	BER [-]	BER [%]	celkový počet chybných bitů [-]	PER [%]	celkový počet chybných paketů [-]	Přenosová rychlost [kb/s]	Počet chyb v záhlaví [-]	SNR [dB]	RSSI [dBuV]
D8PSK	0,1	1	59,53	2024	4,72E-02	4,72	76409	43,03	871	14,2	0	-7,3	41
DQPSK	0,2	1	59,53	2112	9,17E-04	0,09	1550	1,75	37	20,0	0	-7,8	41
DBPSK	0,8	1	59,53	2037	8,10E-04	0,08	1320	1,08	22	11,2	66	-8,0	41
Robustní	9	7	65,53										

žádné chyby

Tab. 25: Výsledné hodnoty měření s impulsním šumem

Proto, aby komunikace vykazovala chyby, bylo nutné pozměnit parametry impulsního rušení, kde doba rušení byla nastavena na 3 ms. Ani při tomto rušení však nebylo možné donutit robustní režim k vykazování chyb vlivem nedostatečného rozsahu generátoru, jak již bylo řečeno. Aby robustní režim začal vykazovat chybovost, bylo by zapotřebí nastavit amplitudu impulsu na hodnotu zhruba 20 V, tedy dvojnásobný rozsah. To lze přepočítat díky skutečnosti, že u robustního režimu s AWGN šumem se začaly projevovat chyby při nastavovaném útlumu 7,5 dB. U měření s impulsním rušením při hodnotě 7 dB nedocházelo k vykazování chybovosti. Rozdíl je tedy 7 dB. Napětí lze převést do jednotek dB, a pokud se přičte 7 dB rozdíl a hodnota bude opět převedena zpět, výsledkem bude hodnota napětí, kterou je potřeba nastavit na generátoru.

Typ modulace	Amplituda impulsu U _{pp} [V]	Nastavovaný útlum [dB]	Celkový útlum [dB]	celkový počet detekovaných paketů	BER [-]	BER [%]	celkový počet chybných bitů [-]	PER [%]	celkový počet chybných paketů [-]	Přenosová rychlost [kb/s]	Počet chyb v záhlaví [-]	SNR [dB]	RSSI [dBuV]
D8PSK	0,6	0	58,53	2023	3,98E-04	0,04	644	1,19	24	23,6	0	-7,3	67
	0,8	0	58,53	2104	1,07E-03	0,11	1807	2,61	55	21,7	0	-7,5	67
	1,0	0	58,53	2006	3,50E-03	0,35	5622	7,73	155	22,7	0	-7,5	67
	1,5	0	58,53	2020	2,03E-02	2,03	32760	32,92	665	15,1	0	-7,5	67
	3,0	0	58,53	2141	1,21E-01	12,11	207407	76,88	1646	6,6	0	-7,8	67
DQPSK	0,4	2	60,53	2025	5,20E-04	0,05	842	1,14	23	19,2	0	-8,3	65
	0,8	2	60,53	2016	4,68E-03	0,47	7540	10,07	203	18,3	0	-8,3	65
	1,5	2	60,53	2003	5,33E-02	5,33	85344	73,74	1477	5,2	2	-8,5	66
	2,0	2	60,53	2179	1,05E-01	10,46	182405	95,69	2085	0,0	0	-8,5	68
DBPSK	0,3	4	62,53	2012	7,41E-04	0,07	1192	1,89	38	12,0	0	-9,3	64
	0,5	4	62,53	2021	2,03E-03	0,20	3279	4,40	89	12,8	0	-9,3	64
	0,8	4	62,53	2068	1,07E-02	1,07	17640	21,18	438	8,8	0	-9,3	63
	2,0	4	62,53	2007	1,35E-01	13,49	216590	97,16	1950	0,0	0	-10,3	64
	1,0	7	65,53	2002	5,60E-04	0,06	897	2,30	46	5,7	1	-10,5	63
Robustní	2,0	7	65,53	2384	7,09E-03	0,71	13519	23,07	550	4,0	2	-10,5	68
	3,0	7	65,53	2012	1,65E-02	1,65	26620	44,83	902	4,0	15	-10,3	62
	5,0	7	65,53	2097	2,81E-02	2,81	47224	63,71	1336	1,6	63	-10,5	62
	7,0	7	65,53	2001	3,62E-02	3,62	57977	72,56	1452	1,6	122	-10,3	69

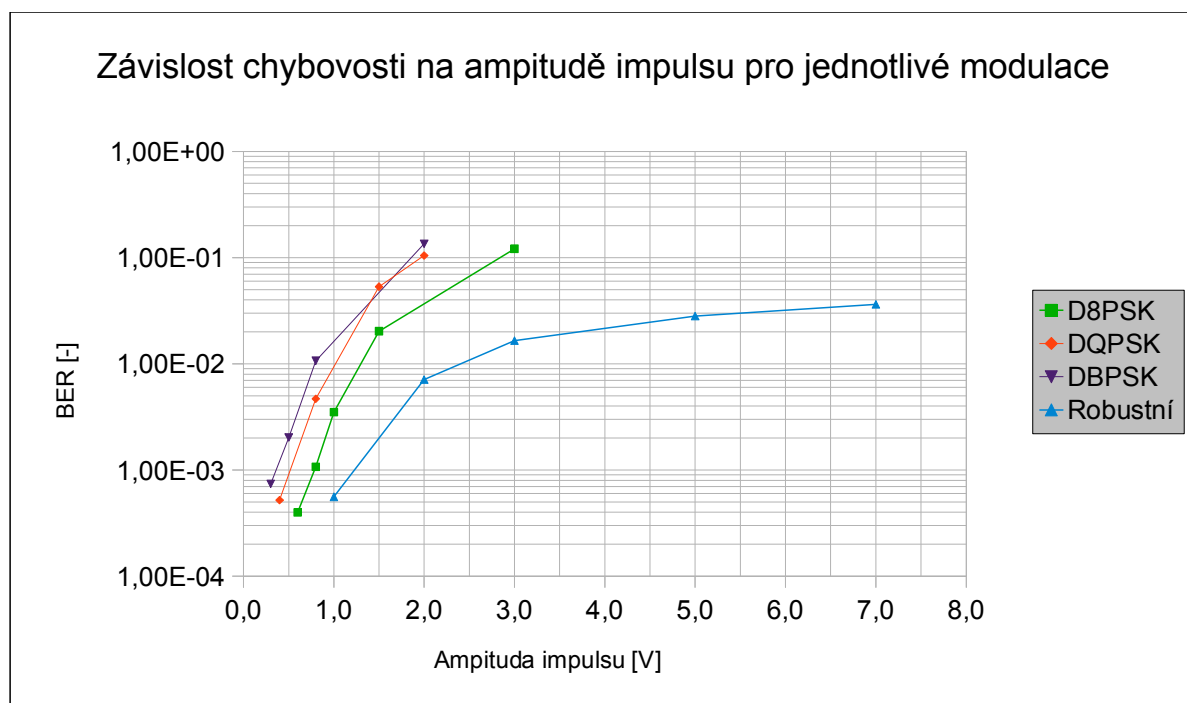
Tab. 26: Výsledné hodnoty měření s impulsním a AWGN šumem

Tab. 26 ukazuje výsledky měření druhé varianty s injektovaným impulsním a AWGN šumem. Proto, aby bylo možné donutit jednotlivé modulační schémata vykazovat chybovost i s omezeným rozsahem generátoru, bylo nutné navyšovat i útlum u jednotlivých modulací. Z výsledků je zřejmé, že robustní modulační schéma je velmi odolná vůči impulsnímu rušení, které se v reálné síti často objevuje. Aby bylo možné u robustního režimu docílit stejné hodnoty chybovosti 10^{-3} jako u AWGN, je nutné nastavit amplitudu impulsu na hodnotu 2 V špička špička. U měření s AWGN šumem se chybovost na této úrovni objevila při celkovém útlumu 66,53 dB, což je rozdíl 1 dB oproti hodnotě s impulsním šumem. Úroveň AWGN byla konstantní -12 dBm, což je hodnota efektivního napětí v dB jednotkách. Výkon impulsního šumu lze vypočítat následovně:

$$U_{ef} = \frac{U_{pp}}{6} = \frac{2}{6} = 0,333 \text{ V} \quad (15)$$

$$P = 20 \log\left(\frac{U_{ef}}{50 \times 10^{-3}}\right) = 16,4 \text{ dBm} \quad (16)$$

To znamená, že pro to aby byl systém schopen vykazovat chybovost při impulsním rušení na úrovni shodné jako AWGN, je třeba dosáhnout hodnoty výkonu 16,4 dBm. To znamená krátký impuls, který je o 28,4 dB výkonu větší, než je konstantní hodnota AWGN šumu -12 dBm. Následující obr. 103 zobrazuje závislosti chybovosti na amplitudě při konstantním útlumu při jednotlivých modulacích. Je však nutné mít na paměti, že jednotlivé modulační schémata měly nastaveny různé konstantní hodnoty útlumu, které je možné vyčíst z tab. 26.



Obr. 103: Závislost útlumu na amplitudě impulsu pro kanál zatížený impulsním a AWGN rušením

11. Závěr

Cílem práce bylo seznámení se s dostupnými úzkopásmovými PLC standardy. Počátek práce je věnován popisu širokopásmových PLC standardů G.hn a IEEE 1901 a jejich následnému porovnání. Více prostoru bylo věnováno dvěma úzkopásmovým standardům, jimiž jsou G3-PLC a PRIME a to z důvodu, že jsou nejvíce rozšířené. V práci je dále podrobně rozebrán standard G.hnem a stručně popsány vlastnosti IEEE 1901.2. Rozbor těchto systémů byl proveden na úrovni spojové a fyzické vrstvy.

Všechny zkoumané úzkopásmové PLC systémy jsou z větší míry postaveny na stejných principech. V následující tabulce je možné porovnat základní vlastnosti těchto systémů.

	Standard			
	G3	PRIME	G.hnem	IEEE 1901.2
Počet nosných frekvencí	36	97	128	36
Frekvenční rozteč mezi kanály [kHz]	1,5625	0,488	3,125	1,5625
Rozměr IFFT (počet vzorků)	256	512	128	256
Vzorkovací frekvence [kHz]	400	250	400	400
Délka cyklické předpony	30	48	20/32	30
Metoda okna	Ano	Ne	Ano	Ano
Zabezpečení FEC	RS kódér, konvoluční kódér	Konvoluční kódér	RS kódér, konvoluční kódér	RS kódér, konvoluční kódér
Typ RS kódu	(255,239)/(255,247)	není	(255,239)	(255,239)/(255,247)
Poměr konvolučního oděru	½	½	½ nebo 2/3	½
Délka konvolučního kóděru	7	7	7	7
Podporované pásmo	CENELEC (A/B/C/D), FCC, ARIB	CENELEC A	CENELEC (A/B/C/D), FCC, ARIB	CENELEC (A/B), FCC, ARIB
Použitelný typ modulace	D8PSK, DQPSK, DBPSK / koherentní varianta	D8PSK, DQPSK, DBPSK / koherentní varianta	16-QAM, QPSK, BPSK	D8PSK, DQPSK, DBPSK, 16-QAM / koherentní varianta
maximální velikost paketu	235 bajtů	2268 bajtů	1680 bajtů	1280 bajtů
Maximální teoretická rychlost [kb/s]	46	128,6	1000	46 pro CENELEC pásmo
Bezpečnostní mechanismy	EAP-PSK	AES-128	AES-128, CCM, AKM	Mechanismus 802.15.4
Transportní vrstva	IPv6	IPv4/IPv6, IEC 62056, IEC 61334-4-32	IPv6, IPv4, Ethernet	IPv6
Robustní režim	RC-4 (RC-6 pouze pro FCH)	není	FRE 4/6/12	RC-4 / RC-6

Tab. 27: Porovnání parametrů jednotlivých standardů

Z tabulky je zřejmé, že teoreticky nejhorší výkonnosti bude dosahovat standard PRIME. Podporu IPv6 u PRIME je možné vlivem struktury spojové vrstvy implementovat do novějších verzí tohoto standardu. Nicméně jeho výhodou jsou vyšší přenosové rychlosti, kde pro nejméně robustní modulaci je teoretická přenosová rychlost rovna 128,6 kb/s. Ostatní tři standardy se liší pouze v některých parametrech. IEEE 1901.2 má výhodu v možnosti provozovat robustní režim RC-6 i pro data. Nejrychlejší teoretický přenos dat je dosažen u G.hnem standardu. Vzhledem k faktu, že každý standard má určité výhody a nevýhody, je nutné brát ohled na parametry trasy a požadavky na přenos dat. Dle těchto kritérií je poté možné zvolit optimální systém PLC.

V praktické části byla provedena série měření na vývojových PLC kitech TMDSPLCKIT-V3 od firmy Texas Instruments. Nejprve byla stručně rozebrána aplikace Zero Configuration GUI, pomocí které se ovládají PLC modemy TMDSPLCKIT-V3. Cílem měření bylo určit mezní hodnoty, při nichž je možné provozovat daný systém na běžných sdělovacích vedeních. Měření bylo provedeno vždy pro všechny typy modulací. Původním plánem bylo srovnat standardy G3-PLC a PRIME, jejichž funkce je podporována PLC kitem. Bohužel i přes veškerou snahu se nepodařilo na modemech zprovoznit standard PRIME. Z praktického hlediska tedy není možné porovnat tento standard s G3-PLC. Teoreticky však lze předpokládat, že u PRIME systému by docházelo k chybovosti při menších hodnotách útlumu a celkově by měl být systém náchylnější na rušení. Tyto předpoklady vyplývají z uvedené tabulky porovnání, kde popisovaná verze PRIME nemá implementován robustní režim ani korekci chyb FEC založenou na RS kódu. Nicméně nejnovější verze PRIME 1.4 zavádí i robustní režim, takže se dají očekávat obdobné výsledky.

V první fázi měření bylo prakticky ověřeno v pásmu CENELEC A, že modulace DBPSK v robustním režimu dosahuje nejlepších výsledků. Modulace dokáže spolehlivě přenášet data při útlumu, který je o 10 dB vyšší než u nejméně robustní modulace D8PSK. Je zřejmé, že s rostoucí robustností modulace klesá přenosová rychlost.

Druhá fáze měření byla rozdělena na tři varianty. Trasa byla modifikována o vedení s délkou 6,9 km a dvě odbočky. Trasa byla proměřena pomocí obvodového analyzátoru, pomocí něhož byla určena frekvenční závislost útlumu vedení. Výsledky jsou víceméně shodné s první fází měření, kde robustní režim opět dosáhl nejvyšší odolnosti a jako limitní hodnota útlumu, při kterém je tento režim možné spolehlivě provozovat, je 85,5 dB. Z teoretických předpokladů vyplývá, že v důsledku připojení odboček by se měl útlum trasy zvýšit zhruba o 6 dB, což bylo následně prakticky ověřeno a celkový útlum trasy se zvýšil o 7 dB. Robustní režim byl opět nejspolehlivější a byla možnost jej provozovat do hodnoty útlumu 84 dB. Dále bylo zjištěno, že robustní režim je možné provozovat až do vzdálenosti 10,455 km.

Poslední varianta spočívala v proměření CENELEC B a BC pásma. Zde bylo zjištěno, že přenos dat v těchto pásmech je možný na mnohem menší vzdálenost a při menších hodnotách útlumu. To je zapříčiněno vyšším útlumem na frekvencích pásma CENELEC B respektive BC.

V poslední fázi měření bylo opět pro pásmo CENELEC A a délka vedení 4,6 km provedeno porovnání pro tři typy rušení: AWGN šum, úzkopásmové rušení a impulsní rušení. Při měření s AWGN šumem byl určen kódový zisk modemů. Z měření dále vyplynulo, že modemy jsou nejvíce náchylné na úzkopásmové rušení. Robustní režim je extrémně odolný proti impulsnímu rušení, což je dáno kombinací opakování dat a jejich prokládání.

12. Literatura

- [1] OKSMAN V., GALLI S. G.hn: The New ITU-T Home Networking Standard [online]. USA:IEEE Communications Magazine, 2009 [cit. 2015-18-9]. Dostupné z WWW: <<http://homegridforum.org/uploads/resources/5CFw/o6Pa.pdf>>
- [2] GALLI S. Simplified Model for the Indoor Power Line Channel [online]. Německo: IEEE ISPLC M, 2009 [cit. 2015-20-9]. Dostupné z WWW: <https://www.researchgate.net/publication/224441728_A_simplified_model_for_the_indoor_power_line_channel>
- [3] ITU-T G.9960 Unified high-speed wire-line based home networking transceivers – Foundation [online]. Švýcarsko: ITU, 2009 [cit. 2015-21-9]. Dostupné z WWW: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.9960-200910-T/en>>
- [4] ITU-T G.9961 Unified high-speed wire-line based home networking transceivers – Data link layer specification [online]. Švýcarsko: ITU, 2009 [cit. 2015-22-9]. Dostupné z WWW: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.9961-201006-S/en>>
- [5] GOLDFISHER S., TANABE S. IEEE 1901 Access systém: An Overview of Its Uniqueness and Motivation [online]. USA: IEEE Communications Magazine, 2010 [cit. 2015-22-9]. Dostupné z WWW: <<http://morse.colorado.edu/~tlen5830/ho/Goldfisher10IEEE1901.pdf>>
- [6] RAHMAN M., HONG a kol. Medium Access Control for Power Line Communications: An Overview of the IEEE 1901 and ITU-T G.hn standards [online]. USA: IEEE Communications Magazine, 2011 [cit. 2015-29-9]. Dostupné z WWW: <<https://goo.gl/Y2eZQB>>
- [7] ITU-T G.9903 Recommendation. Narrowband orthogonal frequency division multiplexing power line communication transceivers for G3-PLC networks [online]. Švýcarsko: ITU, 02/2014 [cit. 2015-1-10]. Dostupné z WWW: <https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.9903-201402-I!!PDF-E&type=items>
- [8] ITU-T G.9904 Recommendation. Narrowband orthogonal frequency division multiplexing power line communication transceivers for PRIME networks [online]. Švýcarsko: ITU, 10/2012 [cit. 2015-19-10]. Dostupné z WWW: <https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.9904-201210-I!!PDF-E&type=items>
- [9] ITU-T G.9902 Recommendation. Narrowband orthogonal frequency division multiplexing power line communication transceivers for ITU-T G.hnem networks [online]. Švýcarsko: ITU, 10/2012 [cit. 2015-1-11]. Dostupné z WWW: <https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.9902-201210-I!!PDF-E&type=items>

- [10] TI G3 Power Line Communication Developer's Kit Design Guide [online] . USA: Texas Instruments, 2014 [cit. 2015-6-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.ti.com/lit/ug/tidu237/tidu237.pdf>>
- [11] SKRÁŠEK T. Úzkopásmová PLC komunikace se standardy G3-PLC, PRIME a IEEE-1901.2 [online]. Brno: Diplomová práce VUT, 2015 [cit. 2015-8-12]. Dostupné z WWW: <https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=100768>
- [12] HOCH M., ALEXANDER F. Comparison of PLC G3 and PRIME [online]. Německo: Universitat Erlangen Norinberg, 2011 [cit. 2015-18-12]. Dostupné z WWW: <http://e2e.ti.com/cfs-file/__key/communityserver-discussions-components-files/171/6114.G3_2D00_PRIME_2D00_COMPAR.pdf>
- [13] GALLI S., LYS T. Next Generation Narrowband (Under 500 kHz) Power Line Communications (PLC) Standards [online]. Čína: China Communications, 2015 [cit. 2015-15-12]. Dostupné z WWW: <[http://www.g3-plc.com/sites/default/files/press-releases/Next%20generation%20NB-PLC%20standards%20\(China%20Comms%202015\).pdf](http://www.g3-plc.com/sites/default/files/press-releases/Next%20generation%20NB-PLC%20standards%20(China%20Comms%202015).pdf)>
- [14] VLACHAU C. MAC Layer Performance Analysis of the IEEE 1901 Standard for Power Line Communications [online]. Švýcarsko: EPFL, 2012 [cit. 2015-15-12]. Dostupné z WWW: <http://wiki.epfl.ch/edicpublic/documents/Candidacy%20exam/write_up_vlachou.pdf>
- [15] LONGINOV O. Netricity PLC and the IEEE P1901.2 Standard [online]. USA: STMicroelectronics, HomePlug [cit. 2015-15-12]. Dostupné z WWW: <http://www.homeplug.org/media/filer_public/e6/01/e601fa7c-078d-4347-bb30-9ff6c28efb12/netricity.pdf>
- [16] LU X., MONNIER O. Developing robust power line communications (PLC) with G3 [online]. USA: Texas Instruments, 2012. Dostupné z WWW: <<http://www.ti.com/lit/wp/slay021/slay021.pdf>>
- [17] BERT L., TONELLO A., ALESSANDRO S. MAC Enhancements for G3-PLC Home Networks [online]. Itálie: Universita di Udine, 2013. Dostupné z WWW: <http://web.diegm.uniud.it/tonello/PAPERS/CONFERENCES/ISPLC2013_1.pdf>
- [18] HRAD J. Modelování účastnických přípojek s odbočkami Access server [online]. Praha: ČVUT FEL, 2005 [cit.2015-20-12]. Dostupné z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.phpcisloclanku=2005120101>>
- [19] LECLARE J., NIKTASH A., LEVI V. An Overview, History, and Formation of IEEE P1901.2 for Narrowband OFDM PLC [online]. [b.m.]: Maxim Integrated 2013 [cit.2015-15-12]. Dostupné z WWW: <<https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/5676>>

- [20] LECLARE J. Overcoming Smart Grid Communications Challenges with Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) and IEEE 1901.2 [online]. [b.m.]: Maxim Integrated 2012 [cit.2015-15-12]. Dostupné z WWW:
<<https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/5356>>
- [21] NASSAR M. aj. Local Utility Powerline Communications in the 3-500 kHz Band: Channel Impairments, Noise and Standards [online]. USA: The University of Texas [201-?] [cit.2015-29-12]. Dostupné z WWW:
<<http://users.ece.utexas.edu/~bevans/papers/2012/powerline/powerlineCommNoiseIEEESPMDraft.pdf>>
- [22] ROSSELLÓ-BUSQUET A. G.hnem for AMI and DR [online]. Dánsko: Technical University of Denmark [201-?] [cit.2015-1-12]. Dostupné z WWW:
<http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:75562/datastreams/file_6627132/content>

13. Seznam obrázků

Obr. 1: Zobrazení jednotlivých pásem.....	2
Obr. 2: Model G.hn sítě, členění domén a protokolový model uzlu	4
Obr. 3: Propojení G.hn sítě [1].....	4
Obr. 4: Frekvenční pásma pro různé typy medií a počet subkanálů pro jednotlivá media [1]....	5
Obr. 5: MAC cyklus ITU-T G.hn [6].....	7
Obr. 6: Rozdělení STXOP intervalu [6].....	8
Obr. 7: Přístupová část dle standardu IEEE 1901 [5].....	9
Obr. 8: Fyzická topologie přístupové buňky [5].....	12
Obr. 9: Synchronizační stromová struktura [5].....	12
Obr. 10: Směrovací stromová struktura [5].....	13
Obr. 11: Rozdělení MAC cyklu [6].....	14
Obr. 12: Spojově orientovaný přístup IEEE 1901 (nahore: FFT OFDM, dole: Wavelet OFDM) [6].....	16
Obr. 13: Základní struktura AMI systému.....	19
Obr. 14: Blokové schéma vysílače G3-PLC [7].....	21
Obr. 15: Struktura datového rámce OFDM PHY [7].....	21
Obr. 16: Struktura potvrzovacího rámce OFDM PHY [7].....	22
Obr. 17: Struktura Scrambleru [7].....	24
Obr. 18: Schéma konvolučního kodéru [7].....	25
Obr. 19: Matice vstupního zásobníku [7].....	26
Obr. 20: Permutační matice pro různé modulace [7].....	26
Obr. 21: Příklad prokládání [7].....	27
Obr. 22: Konstelační diagram diferenciálních modulací [7].....	28
Obr. 23: Blokové schéma filtru preemfáze [7].....	28
Obr. 24: IFFT výstup/vstup a cyklická přípona [7].....	29
Obr. 25: Funkce raised cosine aplikovaná při windowing proceduře [7].....	29
Obr. 26: Překrývání rámců [7].....	29
Obr. 27: Znázornění intervalů CIFS/RIFS/EIFS [7].....	31
Obr. 28: Znázornění připojovacího okna a jeho částí [7].....	31
Obr. 29: Znázornění po sobě jdoucích segmentů dat [7].....	32
Obr. 30: Struktura obecného MAC rámce [7].....	33
Obr. 31: Průběh LBP zpráv v síti [7].....	37
Obr. 32: Schéma přiřazení krátké adresy [7].....	38
Obr. 33: Zabezpečení mezi jednotlivými stanicemi [7].....	39
Obr. 34: Referenční model vrstev ITU-T G.9904 [8].....	40
Obr. 35: Blokové schéma funkčních boků fyzické vrstvy [8].....	41
Obr. 36: Struktura rámce fyzické vrstvy [8].....	41
Obr. 37: Alokace datových a pilotních subnosných [8].....	42
Obr. 38: Alokace frekvencí pilotních a datových subnosných vně záhlaví [8].....	42
Obr. 39: Blokové schéma scrambleru [8].....	42
Obr. 40: Struktura záhlaví fyzické vrstvy [8].....	43
Obr. 41: Mapování nosných frekvencí [8].....	44
Obr. 42: Jednotlivé stavy servisního uzlu [8].....	45
Obr. 43: Hierarchie sítě PRIME [8].....	46
Obr. 44: Struktura adresy [8].....	47
Obr. 45: Příklad přiřazení adresy: fáze 1 [8].....	47
Obr. 46: Příklad přiřazení adresy: fáze 2 [8].....	48
Obr. 47: Příklad přiřazení adresy: fáze 3 [8].....	48

Obr. 48: Příklad přiřazení adresy: fáze 4 [8].....	48
Obr. 49: Struktura časového MAC rámce [8].....	49
Obr. 50: Příklad sekvence kontrolních paketů při povýšení [8].....	50
Obr. 51: Příklad záznamů v přepínací tabulce [8].....	52
Obr. 52: Přidávání záznamů přepínací tabulky [8].....	52
Obr. 53: Struktura obecného MAC záhlaví [8].....	53
Obr. 54: Struktura záhlaví paketu [8].....	54
Obr. 55: Struktura promotion MAC PDU [8].....	54
Obr. 56: Struktura beacon PDU [8].....	55
Obr. 57: Schválený proces registrace [8].....	58
Obr. 58: Zamítnutý proces registrace [8].....	58
Obr. 59: Proces deregistrace iniciovaný terminálem [8].....	58
Obr. 60: Proces deregistrace iniciovaný základním uzlem [8].....	59
Obr. 61: Proces povýšení iniciovaný servisním uzlem [8].....	59
Obr. 62: Proces povýšení zamítnutý základním uzlem [8].....	59
Obr. 63: Degradace iniciována servisním uzlem [8].....	60
Obr. 64: Degradace iniciována základním uzlem [8].....	60
Obr. 65: Ustanovení spojení a) iniciováno servisním uzlem; b) zamítnuto základním uzlem; c) iniciováno základním uzlem; d) zamítnuto servisním uzlem [8].....	61
Obr. 66: Ukončení spojení a) iniciováno servisním uzlem; b) iniciováno základním uzlem; [8].....	62
Obr. 67: Úspěšná alokace CFP periody [8].....	63
Obr. 68: Struktura konvergenční vrstvy [8].....	64
Obr. 69: Struktura záhlaví segmentace [8].....	64
Obr. 70: Příklad IPv4 SSCS spojení [8].....	65
Obr. 71: Algoritmus bezpečnostního profilu 1 [8].....	67
Obr. 72: Obecná architektura sítě [9].....	68
Obr. 73: Obecná EM architektura sítě [9].....	69
Obr. 74: Model fyzické vrstvy [9].....	70
Obr. 75: Struktura rámce fyzické vrstvy [9].....	71
Obr. 76: Struktura záhlaví fyzické vrstvy [9].....	71
Obr. 77: Blokované schéma kodéru datové části [9].....	73
Obr. 78: Blokované schéma OFDM modulátoru [9].....	74
Obr. 79: Struktura preamble [9].....	74
Obr. 80: Struktura spojové vrstvy [9].....	76
Obr. 81: Struktura LLC rámce [9].....	77
Obr. 82: Generování LPDU z LLC rámce [9].....	78
Obr. 83: Struktura CP intervalu [9].....	79
Obr. 84: Ukončení CP založené na době trvání zprávy [9].....	80
Obr. 85: Struktura CP intervalu [9].....	82
Obr. 86: Modem Texas Instruments TMDSPCKIT-V3.....	86
Obr. 87: Ukázka výstupu GUI.....	88
Obr. 88: Schéma zapojení transformačního členu.....	91
Obr. 89: Zapojení pracoviště (první fáze měření).....	92
Obr. 90: Závislost chybovosti na útlumu pro jednotlivé modulace.....	94
Obr. 91: Schéma zapojení pracoviště (druhá fáze měření).....	95
Obr. 92: Závislost útlumu na frekvenci pro celou trasu bez odboček.....	96
Obr. 93: Závislost chybovosti na útlumu pro první variantu měření.....	97
Obr. 94: Závislost útlumu na frekvenci pro první úsek trasy.....	98
Obr. 95: Závislost útlumu na frekvenci pro celou trasu.....	99

Obr. 96: Závislost chybovosti na útlumu při měření druhé varianty	101
Obr. 97: Závislost útlumu na frekvenci pro maximální dosaženou vzdálenost	103
Obr. 98: Zapojení měřícího pracoviště (Třetí fáze měření).....	104
Obr. 99: Závislost útlumu na frekvenci pro kanál zatížený AWGN šumem	106
Obr. 100: Závislost chybovosti jednotlivých diferenciálních modulací na SNR.....	106
Obr. 101: Závislost útlumu na frekvenci pro kanál zatížený úzkopásmovým rušením.....	108
Obr. 102: Impulsní rušení typu RAIN.....	109
Obr. 103: Závislost útlumu na amplitudě impulsu pro kanál zatížený impulsním a AWGN rušením.....	110

14. Seznam tabulek

Tab. 2: Porovnání vlastností IEEE 1901 a ITU-T G.hn [6].....	18
Tab. 3: Porovnání standardizačních organizací [6].....	18
Tab. 4: Oblasti použití PLC standardů [6].....	18
Tab. 5: FCH struktura pro CENELEC plán [7].....	22
Tab. 6: FCH struktura ACK/NACK záhlaví pro CENELEC [7].....	23
Tab. 7: Dekódovací tabulka pro diferenciální modulace k-té subnosné [7].....	28
Tab. 8: Rozložení pole Segment Control v záhlaví MAC [7]	33
Tab. 9: Parametry fyzické vrstvy [8].....	41
Tab. 10: Adresy zařízení [8]	49
Tab. 11: Druhy kontrolních paketů [8].....	56
Tab. 12: Parametry FEC kódování [9].....	72
Tab. 13: Parametry OFDM modulace [9].....	75
Tab. 14: Rozsahy adres uzlu pro režim krátké adresace [9].....	81
Tab. 15: Použité přístroje pro měření.....	87
Tab. 16: Parametry transformačního členu.....	90
Tab. 17: Naměřené výsledky první fáze měření.....	92
Tab. 18: Parametry fyzické vrstvy modemů.....	94
Tab. 19: Výsledné hodnoty měření první varianty.....	96
Tab. 20: Výsledné hodnoty měření druhé varianty.....	99
Tab. 21: Výsledné hodnoty měření B a BC pásma.....	101
Tab. 22: Výsledné hodnoty měření s AWGN.....	104
Tab. 23: Tabulka kódových zisků.....	105
Tab. 24: Výsledné hodnoty měření s úzkopásmovým šumem.....	106
Tab. 25: Výsledné hodnoty měření s impulsním šumem.....	108
Tab. 26: Výsledné hodnoty měření s impulsním a AWGN šumem.....	108
Tab. 27: Porovnání parametrů jednotlivých standardů.....	110

15. Seznam použitých zkratk

Zkratka	Name	Název
6LoWPAN	Low-power Personal Area Network	Protokol pro nízko-napěťové PAN sítě
ACK	Acknowledgement	Potvrzení
AF	Aggregation and Fragmentation block	Blok pro agregaci a fragmentaci
AGC	Automatic Gain Control	Automatická kontrola zisku
AKM	Authentication and Key Management	Správa ověření a klíče
AM	Authentication Module	Ověřovací modul
AMI	Advanced Metering Infrastructure	Infrastruktura pro pokročilé měření
AMI	Advanced Metering Infrastructure	Infrastruktura pro pokročilé monitorování
AMM	Advanced Meter Management	Pokročilá správa měření
AMR	Automatic Meter Reader	Automatické měřidlo
APC	Application Protocol Convergence	Podvrstva spojové vrstvy pro konvergenci protokolů aplikační vrstvy
APC	Application Protocol Convergence Sublayer	Konvergenční podvrstva aplikačních protokolů spojové vrstvy G.hnem
ARQ	Automatic Repeat Request	Požadavek na automatické přeoslání
AUI	Application Unique ID	Unikátní identifikátor aplikace
BAT	Bit Allocation Table	Tabulka pro alokaci bitů
BER	Block Error Rate	Bloková chybovost
BL	Beacon Level	Úroveň kontrolní zprávy
BPDU	Beacon PDU	Beacon PDU
BPL	Broad Band Power Line	Široko-pásmová komunikace na silovém vedení
BPR	Beacon Proxy	Proxy stanice pro beacon zprávy
BSI	Beacon Slot Information	Informace ohledně beacon slotů
CC	Connection Control	Informační bit segmentace
CCM	Counter Cipher Mode with Block Chaining Message Authentication	Šifrovací mechanismus
CCM	Cipher block Chaining Message	Zřetězení zašifrovaných bloků zpráv
CE	Constellation Encoder	Blok pro převod bitů na komplexní číslo dle konstelace
CES	Channel Estimation Symbol	Symbol pro odhad kanálu
CFP	Connection Free Period	Bez-spojová připojovací perioda
CFS	Connection Free Slot	Bez-spojový připojovací interval
CFTXOP	Connection Free TXOP	Bez-spojový TXOP
CID	Connection ID	Identifikátor spojení
CIFS	Connection Inter-Frame Space	Ochranný mechanismus, mezera mezi rámci
CLI	Connection Level Information	Informace o úrovni spojení
CP	Cyclic Prefix	Cyklická předpona
CP	Connection Period	Připojovací perioda
CPCS	Common Part Convergence Sublayer	Společná konvergenční podvrstva
CSMA/CA	Carrier Sense Medium Access/Collision Avoidance	Metoda přístupu na medium
CTS	Clear To Send	Volno k odeslání
CW	Connection Window	Okno pro připojení
DAP	Domain Access Point	Přístupový bod k doméně
DM	Domain Master	Řídící uzel domény
DMS	Domain Master Selection	Vyhledání hlavní stanice domény
DSI	Device Specific Information	Specifické informace zařízení
EIFS	Extended Inter-Frame Space	Rozšířený ochranný interval
EM	Energy Management	Správa energie
EM-HAN	Energy Management Home Area Network	Domácí síť pro správu energie
FB	Fragment Buffer	Zásobník fragmentů
FD	Frequency Division	Frekvenční dělení
FCH	Frame Control Header	Kontrolní záhlaví fyzické vrstvy
FRA	FRAME	Kontrolní rámec PRIME
FRE	Fragment Repetition Encoder	Kodér pro opakování fragmentů
GM	Global Master	Řídící uzel všech domén pod jednou správou
GMK	Group Master Key	Hlavní klíč

HAN	Home Area Network	Domácí síť
HE	Head end Station	Hlavní stanice v síti
HG	Home Gateway	Domácí brána
IB	Interdomain Bridge	Uzel pro komunikace mezi doménami
ICI	Inter-Carrier Interference	Mezi-kanálová interference
IDB	Inter Domain Bridge	Mezi-doménový přepínač
IE	Information Elements	Informační element
IH	In Home	Domácí síť
LBS	6LoWPAN Bootstrapping Server	Server LBS
LCID	Local Connection ID	Identifikátor lokálního spojení
LIB	6LoWPAN Information Base	Informace nutné pro připojení do PAN
LLC	Logical Link Control	Podvrstva spojové vrstvy pro segmentaci a další funkce
LLC	Logical Link Control Sublayer	Podvrstva logické kontroly spojení vrstvy spojové standardu G.hnem
LNID	Local Node Identifier	Identifikátor lokálního uzlu
LSID	Local Switch identifier	Lokální identifikátor přepínače
MAC	Medium Access Control	Podvrstva spojové vrstvy pro řízení přístupu na medium
MAP	Media Access Plan	Plán pro přístup k mediu
MAP	Medium Access Plan	Informace o přístupu na medium
MHR	Mac Header	Záhlaví MAC
MIC	Message Integrity Check	Kontrola integrity zprávy
MMH	Management Message Header	Záhlaví pro správu
MS-MPDU	Multi-Segment MPDU mode	Více-segmentový režim MPDU
MSDU	MAC Service Data Unit	MSDU rámec
NAM	Network Management and Account Module	Modul pro správu sítě a účtů
NID	Node Identifier	Identifikátor uzlu
NTB	Network Time Base	Bitová hodnota určující čas odeslání beacon zprávy
NTU	Network Termination Unit	Opakovač schopný posílat data mezi příslušnou a jinou sítí
PAN ID	Personal Area Network ID	Identifikátor PAN sítě
PCS	Physical Coding Sublayer	Podvrstva fyzického kódování
PCS	PHY Carrier Sense	Naslouchání nosné na fyzické vrstvě
PCS	Physical Coding Sublayer	Podvrstva fyzické vrstvy pro kódování G.hnem
PLC	Power Line Communication	Komunikace po silovém vedení
PMA	Physical Medium Attachment	Podvrstva fyzické vrstvy pro zabezpečení a korekci chyb
PMA	Physical Media Attachment	Podvrstva fyzické vrstvy G.hnem standardu
PMD	Physical Medium Dependent	Podvrstva fyzické vrstvy pro alokaci bitů a OFDM modulaci
PMD	Physical Medium Dependent	Podvrstva fyzické vrstvy G.hnem standardu
PNPDU	Promotion Needed PDU	PDU pro požadavek povýšení
PREP	Path Reply Frame	Odpověď na informace o cestě
PREQ	Path Request Frame	Požadavek na informace o cestě
PRIME	Powerline Intelligent Metering Evolution	Standard PLC
PRS	Priority Resolution Period	Časový interval pro určení priority
PSI	PAN Specific Information	Specifické informace PAN
QC-LDPC	Quasi-Cyclic Low Density Parity Check	Quazi-cyklická paritní kontrola
QoS	Quality Of Service	Kvalita služby
RA	Relay Node	Přesílací uzel

RC	Repetition Code	Opakovací kód
RDP	Route Discovery Period	Časový úsek pro opravu cesty
RIFS	Response Inter-Frame Space	Ochranný interval mezi rámci odpovědi
RMS-DS	Root Mean Square Delay Spread	Střední kvadratická hodnota rozšíření spoždění
RP	Repeating Station	Opakovač
RREP	Repair Reply Frame	Odpověď na požadavek ohledně opravy cesty
RREQ	Repair Request Frame	Požadavek na opravu cesty
RTS	Request To Send	Požadavek na odeslání
SCP	Shared Connection Period	Spojově orientovaná připojovací perioda
SID	Switch Identifier	Identifikátor přepínače
SNA	Subnetwork Address	Adresa podsítě
SNID	Short Network Identification	Síťová adresa
SS-MPDU	Single Segment MPDU mode	Jedno-segmentový režim MPDU
SSCA	Subsequent Segment Collision Avoidance	Mechanismus předcházení kolize následujících segmentů
SSCS	Service Specific Convergence Sublayers	Konvergenční podvrstva specifické služby PRIME
STXOP	Shared TXOP	Sdílený TXOP
T M	Tone Mapper	Blok pro mapování nosných
TDMA	Time Division Media Access	Časová metoda přístupu k mediu
TEI	Terminal Entity Identification	Identifikátor stanice
TMR	Tone Map Response	Odpověď s tónovou mapou
TXOP	Transmission Opportunity	Interval pro příležitost vysílání dat
UAN	Utility Access Network	Přístupová síť služeb
VCS	Virtual Carrier Sense	Naslouchání nosné virtuální

